

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКОЕ АГЕНТСТВО
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ БИОФИЗИКИ»
ФЕДЕРАЛЬНОГО МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКОГО АГЕНТСТВА**



АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Материалы юбилейной конференции,
посвященной 70-летию ФГБУН «Южно-Уральский институт биофизики»
ФМБА России

Озерск,
10-13 октября 2023 года

УДК 621.039
ББК 68.69я43
А43

А43 Актуальные вопросы радиационной безопасности: Сб. материалов юбилейной научной-практической конференции «Актуальные вопросы радиационной безопасности», посвященной 70-летию Южно-уральского института биофизики / Под общ. ред. к.б.н. С.А. Романова, д.м.н. М.Э. Сокольниковой. – М.: Издательство «Перо», 2023. – Мб [Электронный ресурс]

ISBN 978-5-00218-774-4

Сборник подготовлен по материалам юбилейной научной-практической конференции «Актуальные вопросы радиационной безопасности», посвященной 70-летию Южно-уральского института биофизики, проходившей 10-13 октября 2023 года в г. Озерске Челябинской области.

В сборнике представлены тезисы докладов ученых и специалистов по направлениям «Биофизические исследования. Обеспечение радиационной безопасности предприятий ядерно-энергетического комплекса», «Отдаленные последствия ионизирующих излучений», «Радиобиологические основы патогенеза и лечения последствий ионизирующих излучений», «Радиоэкология».

Поступившие материалы публикуются по текстам, представленным авторами. Составители выражают благодарность всем авторам за предоставленные доклады.

Издание представляет интерес для научных работников и практических специалистов в области дозиметрии, радиационной безопасности, а также радиационной медицины, биологии и экологии.

Конференция организована при поддержке ФМБА России.

УДК 621.039
ББК 68.69я43

ISBN 978-5-00218-774-4

© ФГБУН ЮУриБФ ФМБА России, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Биофизические исследования. Обеспечение радиационной безопасности предприятий ядерно-энергетического комплекса. Достижения и перспективы

Современный подход к реализации производственного радиационного контроля.....	7
Санитарно-гигиеническое обеспечение радиационной безопасности населения	10
Радиационно-гигиенический мониторинг в зоне наблюдения Белоярской АЭС за период с 2012 по 2021 гг.....	12
Междисциплинарные научные исследования Северского биофизического научного центра	13
Гигиеническая оценка защитных мероприятий при удалении отработавшего ядерного топлива с территории пункта временного хранения	15
Анализ взаимосвязи между удельной активностью Ra-226 в строительных материалах и объемной активностью радона в многоэтажных жилых зданиях	16
Радиационная безопасность населения: опыт и перспективы развития.....	17
Радиационно-гигиенические аспекты обращения с телами умерших, загрязненными радиоактивными материалами	19
Развитие и совершенствование системы ИДК профессионального внутреннего облучения. Научно-практический опыт ФГБУН ЮУрИБФ ФМБА России.....	20
Биологическая дозиметрия трития при смешанном облучении.....	22
Разработка алгоритмов искусственного интеллекта для задач ретроспективной дозиметрии внутреннего облучения	24
Обмен цезия-137 между клетками и экстрацеллюлярной жидкостью	25
Дозиметрия красного костного мозга от инкорпорированных бета-излучателей.....	28
Системное обоснование развития двухкомпонентной ЯЭ на базе РБН с учетом радиационно-эквивалентного подхода к обращению с РАО	30

2. Отдаленные последствия ионизирующих излучений

Оптимизация протоколов компьютерно-томографических исследований для новорожденных пациентов на примере фантомного исследования для компьютерного томографа Ingenuity 128, Philips.....	31
Состояние слизистой оболочки желудка среди персонала радиационно опасного производства, контактирующего с тритием, по результатам серологического скрининга.....	33
Риск онкологических заболеваний у населения, облученного на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа, за 57-летний период наблюдения	35
Заболеваемость раком молочной железы среди женщин, облученных на Южном Урале в детском возрасте.....	37
Гармонизация результатов многолетнего мониторинга содержания ⁹⁰ Sr в организме человека.....	39
Радиологическое воздействие на население за счет атмосферных выбросов модулей ОДЭК и ПЭК.....	41

Величина «эффекта здорового работника» у персонала ядерной индустрии сравнима с показателями для пилотов, атлетов и военнослужащих	42
Оценка заболеваемости, смертности и летальности вследствие повторного инфаркта миокарда в когорте лиц, работающих на объектах использования ионизирующего излучения.....	44
Структурно-функциональные особенности и морфогенез радиационно-индуцированного рака легкого у лиц, подвергшихся профессиональному облучению.....	46
Риск катаракты в когорте работников ПО «Маяк».....	48
Преконцептивное облучение мужчин: заболеваемость солидными раками среди потомков первого поколения	50
Динамика заболеваемости раком щитовидной железы у жителей г. Озерска.....	52
Компьютерная томография как фактор канцерогенного риска среди населения города атомной промышленности.....	53
Врожденные пороки развития у потомков работников производственного объединения «Маяк».....	55
Структура смертности населения г. Озерска за период 1948-2014 гг.	57
3. Радиобиологические основы патогенеза и лечения последствий ионизирующих излучений	
<hr/>	
Влияние импульсного магнитного поля на репарацию радиационно-индуцированных повреждений ДНК.....	58
Реакция клеток растений на комбинированное действие ИМП и ИИ.....	60
Состояние здоровья населения, проживающего на территориях в зоне влияния радиационного фактора	61
Исследование влияния трансплантации мезенхимальных стволовых клеток жировой ткани в сочетании с хирургическим иссечением лучевых язв при терапии тяжелых радиационных поражений кожи в эксперименте.....	63
Количественная оценка пула регуляторных Т-лимфоцитов в отдаленные сроки после хронического облучения человека.....	65
Ретроспективная биодозиметрия инкорпорированных радионуклидов с использованием метода FISH.....	67
Ретроспективная оценка дозы с помощью трёхцветного FISH-метода у разных пациентов, подвергшихся острому аварийному облучению.....	68
72 года клиническому отделу радиационной медицины	70
Изменение степени метилирования ДНК в лимфоцитах после облучения крови в дозе 1,5 гр <i>in vitro</i>	77
Опыт лечения комбинированного радиационного поражения у работника предприятия атомной промышленности (ФГУП «ПО «Маяк»).....	79
Оценка влияния низких доз облучения на заболеваемость катарактой среди населения, облучившегося на реке Теча и Восточно-Уральском радиоактивном следе.....	81
Аддитивные временные компоненты ответных реакций психофизиологических тестов как источник новой дополнительной диагностической информации о функциональном состоянии ЦНС специалистов аварийно-спасательных формирований	82

Структурные нарушения генома у лиц, подвергшихся внутриутробному облучению	84
Динамика содержания маркеров атеросклеротического поражения сосудов у работников, подвергшихся хроническому облучению	86
Влияние фракционированного гамма-облучения на показатели поведения у мышей	88
Оценка радиозащитного действия липосомальной формы меркаптоэтиламина	90

4. Радиоэкология

Дендроиндикация последствий Кыштымской аварии методами дендрохронологии и цифровой анатомии древесины.....	92
Генетическое разнообразие грызунов в зоне ВУРС по данным анализа молекулярных маркеров	94
Genetic diversity of rodents inhabiting EURT zone according to the analysis of molecular markers	95
Радиобиологическая оценка воздействия на окружающую среду затопленных объектов в арктической зоне Российской Федерации.....	96
Радиобиологическое влияние на человека и окружающую среду объектов уранового наследия	98
Трансгенерационные эффекты у подорожника большого из зоны Восточно-Уральского радиоактивного следа	100
Изменчивость радиобиологических эффектов у растений в условиях сочетанного действия разных факторов.....	101
Особенности адаптации рыб, обитающих в радиационно-загрязненной среде, к экологическим факторам.....	103
Наследственная эпигенетическая радиоадаптация грызунов на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа.....	105
Комплексное эколого-гигиеническое обследование территории расположения объектов ядерного наследия в санитарно-защитной зоне АО «АЭХК».....	107
Комплексный подход к мониторингу среды обитания и состояния здоровья населения на территориях расположения объектов ядерного наследия	108
Индикаторы миграции урана в подземные воды в районе расположения шламохранилищ АО «АЭХК»	110
Характеристика зообентоса специальных промышленных водоемов ПО «Маяк».....	112
Ликвидация «объекта ядерного наследия», организация и проведение радиационного мониторинга персонала и окружающей среды	114

Уважаемые коллеги!

Приветствую вас на Юбилейной научно-практической конференции «**Актуальные проблемы радиационной безопасности**», посвященной 70-летию Южно-уральского института биофизики.

Организатором конференции является федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Южно-Уральский институт биофизики» Федерального медико-биологического агентства при поддержке ФМБА России.

Возникнув в 1953 году как филиал московского института биофизики, ЮУрИБФ сосредоточился на изучении действия ионизирующих излучений на человека и другие биологические объекты в интересах радиационной безопасности и охраны здоровья персонала предприятий атомной промышленности и населения, проживающего вблизи от таких предприятий.

Уже 70 лет институт проводит фундаментальные и прикладные научно-исследовательские работы в области радиобиологии, радиационной медицины, генетики, эпидемиологии, дозиметрии, радиоэкологии, гигиены труда, радиационной безопасности и медицинской защиты.

Благодарю вас за интерес, проявленный к нашей Конференции! Верю, что и те, кто принимает непосредственное участие в ее работе, и те, кто подключился в режиме видео-конференц-связи, смогут получить нужные ответы и задать вопросы.

И поскольку *discussio mater veritas est*, как говорили древние, начнем же дискуссию и обрящем истину!



A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'С.А. Романов', written in a cursive style.

директор
ФГБУН ЮУрИБФ ФМБА России
к.б.н. С.А. Романов

1. Биофизические исследования. Обеспечение радиационной безопасности предприятий ядерно-энергетического комплекса. Достижения и перспективы

Современный подход к реализации производственного радиационного контроля

Т.В. Шарапова, Г.Н. Семочкина, Ю.Д. Удалов

ФГБУ «Федеральный научно-клинический центр медицинской радиологии и онкологии»
ФМБА России, Димитровград
semochkinagn@fvcmrfmba.ru

Сегодня ядерная медицина является важнейшим направлением развития высокотехнологичного, персонализированного подхода к диагностике и лечению онкологических заболеваний.

В настоящее время ФНКЦРиО ФМБА России (далее — Центр) является одним из самых крупных учреждений в структуре ФМБА России, а также комплексов замкнутого цикла в Европе. Уникальное научно-исследовательское пространство Центра реализует решение актуальных проблем в области онкологии, радиологии и радиотерапии, а также ядерной медицины и медицинской физики.

Учитывая такую особенность Центра, как большая концентрация радиационно-опасных объектов на одной площадке, важно и необходимо соблюдать требования радиационной безопасности.

Система радиационного контроля включает в себя комплекс организационных (правила, порядок, методики и т.д.) и технических (аппаратура радиационного контроля) мероприятий, предназначенных для организации и проведения контроля за:

- соблюдением норм и правил радиационной безопасности на объектах, в которых проводятся работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующего излучения;
- радиационной обстановкой (мощностью дозы гамма-излучения, уровнями радиоактивного загрязнения рабочих поверхностей и оборудования, объемной активностью газов и аэрозолей) в зоне контролируемого доступа;
- уровнями облучения персонала;
- уровнями радиоактивного загрязнения кожных покровов, СИЗ и одежды персонала;
- сбором и временным хранением жидких и твердых радиоактивных отходов.

Контроль радиационной обстановки проводится как с помощью стационарных приборов и систем, так и с помощью переносных (портативных) приборов. Кроме того, в Центре установлены автоматизированные системы радиационного контроля (далее — АСРК) MediSmarts Radiation Monitoring System и УДКС-01 «Пеликан», позволяющие вести оперативный радиационный контроль объемной активности радионуклидов в воздухе помещений и мощности дозы гамма-излучения в помещениях, где проводятся работы с радиоактивными веществами. Используемые АСРК оборудованы средствами звуковой и световой сигнализации о превышении установленных пороговых значений мощности дозы гамма-излучения.

Специалистами отдела радиационной безопасности Центра самостоятельно осуществляется индивидуальный дозиметрический контроль доз внешнего облучения персонала, отнесенного к категориям групп А и Б.

В Центре осуществляется персональное информирование сотрудников (письменное ознакомление в ведомости) о величине полученных ими индивидуальных и эквивалентных доз облучения. В таблице ниже приведены значения индивидуальных эффективных доз персонала подразделений, в которых проводятся работы с радиоактивными веществами, за период 2020-2022 гг.

Таблица. Индивидуальные эффективные дозы персонала.

Должность	Эффективная доза*, мЗв		
	Суммарная за 2020	Суммарная за 2021	Суммарная за 2022
Отделение радионуклидной диагностики Центра ядерной медицины			
Врач-рентгенолог	0,88	0,62	1,61
Медицинская сестра процедурной	2,52	6,52	7,15
Персонал ЦРХК**	0,86	1,00	1,61
Санитарка	0,98	3,05	4,17
Оператор ПЭТ/КТ и ОФЭКТ/КТ	1,86	4,17	3,07
Отделение радионуклидной терапии Центра ядерной медицины			
Врач-радиолог	0,87	1,07	1,26
Медицинская сестра процедурной	0,31	2,17	2,54
Медицинская сестра палатная	0,43	1,15	1,29
Санитарка	0,37	1,10	1,14
Протонный и фотонный центр			
Врач-радиотерапевт	0,55	1,00	0,82
Медицинский физик	0,55	0,89	0,86
Техник	0,47	0,87	0,97

Примечание: * приведены усредненные значения индивидуальных эффективных доз для каждой профессии;

** ЦРХК – циклотронно-радиохимический комплекс.

Увеличение лучевой нагрузки на персонал группы А за период 2020-2022 годы связано с увеличением количества проводимых рентгенодиагностических процедур пациентам и проведением работ по лучевой терапии закрытыми и открытыми радионуклидными источниками. При этом, индивидуальные риски возникновения стохастических эффектов у персонала группы А в 2020-2022 годах не превышают индивидуальный пожизненный риск $1,0 \times 10^{-3}$ в соответствии с п.2.3 НРБ-99/2009 «Нормы радиационной безопасности».

Также отдел радиационной безопасности обеспечивает ежедневный контроль за выполнением персоналом норм радиационной безопасности, требований правил, инструкций и другой нормативно-технической документации по вопросам обеспечения радиационной безопасности.

Персонал, работающий с техногенными источниками излучения, регулярно проходит аттестацию и повышает свою квалификацию по вопросам обеспечения радиационной безопасности. Лица, назначенные ответственными за обеспечение физической защиты радиационных источников, дополнительно проходят курсы повышения квалификации по программе «Физическая защита радиационных источников, радиоактивных веществ и пунктов хранения», а назначенные ответственными за учёт и контроль радиоактивных веществ и радиоактивных отходов – курсы повышения квалификации по программе «Учет и контроль радиоактивных веществ и радиоактивных отходов».

Также имеет смысл обмен опытом по вопросам обеспечения радиационной защиты и безопасности при медицинском облучении, изложенным в международных требованиях безопасности МАГАТЭ. Конкретные рекомендации и руководство по выполнению требований МАГАТЭ в отношении использования ионизирующего излучения в медицинских целях позволят провести независимую объективную и беспристрастную оценку собственных мер по радиационной защите и безопасности при медицинском облучении и реализовать их улучшение.

Вопросы аварийной готовности и экстренного реагирования в Центре также являются критически важными для безопасности персонала и пациентов. Наибольшая эффективность организации противорадиационной защиты достигается при реализации комплексного, планомерного и своевременного взаимодействия персонала (рис. 1):



Рисунок 1. Проведение аварийной тренировки в ФГБУ ФНКЦРиО ФМБА России по оказанию первой помощи пострадавшим с вовлечением радиоактивных веществ

В настоящее время реализуется эффективное внедрение достижений ядерной медицины в практическое здравоохранение, что само собой подразумевает беспрекословное соблюдение всех основных принципов обеспечения радиационной безопасности.

Санитарно-гигиеническое обеспечение радиационной безопасности населения

Н.К. Шандала, В.А. Серегин, Ю.Е. Квачева, С.М. Киселев, Е.Г. Метляев

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

nshandala@gmail.com

Одним из основных направлений и главным назначением деятельности ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России является санитарно-гигиеническое обеспечение радиационной безопасности и защиты населения, проживающего в районах расположения предприятий атомной промышленности, а также разработка необходимых санитарных норм, правил, методических и других нормативных документов в соответствующей области санитарного законодательства. Это важнейшее направление изначально являлось одной из генеральных задач гигиенических подразделений Института биофизики.

В 60-70-е годы прошлого столетия интенсивно развивались основы научно-методической деятельности всей системы санитарно-эпидемиологического надзора за радиационной обстановкой в СССР, создавшейся в результате глобальных выпадений продуктов испытательных взрывов ядерного оружия. Испытания ядерного оружия, строительство атомных подводных лодок, создание атомного ледокольного флота, строительство новых объектов и освоение новых технологий в атомной промышленности, развитие атомной энергетики – везде санитарные врачи и врачи-гигиенисты были в первых рядах специалистов, осваивающих новые ядерные технологии, и эффективно решали вопросы обеспечения безопасности и защиты населения.

Концептуальные основы регламентации воздействия малых доз радиации на человека легли в основу современной технологии санитарно-эпидемиологического надзора и нормирования, а также основополагающей системы осуществления научных исследований в области радиационной гигиены — проведения радиационно-гигиенического мониторинга, понятие которого было введено в практику обеспечения радиационной безопасности в 2000 г. В настоящее время радиационно-гигиенический мониторинг является основной технологией современной радиационной гигиены.

Современный этап развития радиационно-гигиенического мониторинга характеризуется развитием интегративного подхода к оценке качества жизни населения, заключающегося в формировании единой информационно-аналитической платформы на базе накопленных данных гигиенических исследований, а также разработанной новой методологии оценки состояния здоровья населения и персонала. Анализ, оценка и выявление причинно-следственных связей осуществляются с использованием современных цифровых технологий.

Сегодня нами проводится комплекс исследований с последующей разработкой рекомендаций и оценкой состояния здоровья населения, проживающего вблизи действующих атомных станций и других радиационно-опасных объектов, на территориях ядерного и уранового наследия в России и странах Центральной Азии. ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России вносит достойный вклад в области радиационной безопасности населения при создании замкнутого ядерного цикла, включая строительство принципиально новых ядерных энергоблоков, создание новых видов ядерного топлива и технологий его регенерации.

В результате проведенного анализа современного состояния вопросов санитарно-гигиенического обеспечения радиационной безопасности населения, как в России, так и за рубежом, были выявлены практически одинаковые вызовы, связанные с необходимостью решения ряда перспективных проблем.

В первую очередь — совершенствование новой системы радиационной защиты, в частности, решения проблем нормативно-методической деятельности в ситуациях существующего облучения. В отличие от ситуации планируемого облучения, когда условия

можно предсказать заранее, в ситуации существующего облучения, т.е. когда облучение уже происходит, важным условием является оценка путей, степени воздействия и состояния радиационной защиты.

Во-вторых, это вопросы, связанные с санитарно-гигиеническим сопровождением работ с отработавшим ядерным топливом, обращением с радиоактивными отходами, а также выводом из эксплуатации атомных объектов, отслуживших свой ресурс. Немаловажное значение имеет также санитарно-гигиеническое обеспечение новых технологий атомной промышленности и энергетики, а также новых видов ядерного топлива.

В-третьих, — совершенствование базовых условий обеспечения радиационной безопасности в связи с наличием накопленных проблем — ядерное и урановое наследие, когда необходимой становится разработка новой методологии системы комплексного радиационно-гигиенического мониторинга и изучения состояния здоровья населения.

**Радиационно-гигиенический мониторинг
в зоне наблюдения Белоярской АЭС
за период с 2012 по 2021 гг.**

Регина Владимировна Щедрова

ФГБУЗ ЦГиЭ № 32 ФМБА России, Заречный, Свердловская область
cgsn32sec@mail.ru

На территории городского округа Заречный Свердловской области расположены потенциальные источники радиоактивного загрязнения — Белоярская АЭС, отнесенная к I категории радиационной опасности, и акционерное общество «Институт реакторных материалов» (эксплуатирующее исследовательский реактор типа ИВВ-2М), отнесенное к III категории радиационной опасности. На сегодняшний день функционируют два энергоблока Белоярской АЭС (БН-600 и БН-800), два энергоблока выведены из эксплуатации. Основными источниками поступления радионуклидов в окружающую среду в процессе деятельности являются вода и выбросы в атмосферный воздух с первой, второй и третьей очереди Белоярской АЭС, а также площадки АО «ИРМ». Одним из критериев для оценки влияния деятельности радиационных объектов является радиационно-гигиенический мониторинг компонентов внешней среды.

На основании государственных нормативных документов ежегодно органом, осуществляющим санитарно-эпидемиологический надзор (Межрегиональным управлением № 32 ФМБА России), составляется и утверждается Регламент исследований при осуществлении социально-гигиенического мониторинга в городском округе Заречный (далее Регламент). На основании данного Регламента ИЛЦ ФГБУЗ ЦГиЭ № 32 ФМБА России производит отбор и исследование проб объектов окружающей среды на радиационные показатели с установленной периодичностью. Основными исследуемыми показателями являются суммарная активность бета-излучающих нуклидов, удельная активность ^{90}Sr , ^{137}Cs , как показатели техногенного воздействия радиационных объектов

Цель представленной работы состояла в оценке результатов радиационно-гигиенического мониторинга на территории зоны наблюдения Белоярской АЭС в периоды с 2012 по 2016 и с 2017 по 2021 гг. по данным ИЛЦ ФГБУЗ ЦГиЭ № 32 ФМБА России, на основании которой можно сделать вывод о возможном влиянии действующих радиационных объектов на территории городского округа Заречный.

В работе графически представлен сравнительный анализ среднегодовых значений суммарной активности бета-излучающих нуклидов, удельной активности ^{90}Sr , ^{137}Cs в период с 2012 по 2021 гг. в объектах окружающей среды (атмосферных осадках и выпадениях, почве, воде водоемов, сточной воде, пищевых продуктах) в зоне наблюдения Белоярской АЭС.

По итогам анализа данных лабораторных исследований ИЛЦ ФГБУЗ ЦГиЭ № 32 ФМБА России в рамках радиационно-гигиенического мониторинга, содержание основных техногенных радионуклидов (^{90}Sr , ^{137}Cs) в объектах окружающей среды за период с 2012 по 2021 гг. не превышало установленные нормативными документами допустимые уровни, также в указанный период отмечена тенденция к снижению значений данных показателей в исследуемых объектах.

Выполненная работа ФГБУЗ ЦГиЭ № 32 ФМБА России в рамках радиационно-гигиенического мониторинга согласно ежегодному Регламенту позволяет оценить радиационную ситуацию на территории городского округа за период с 2012 по 2021 гг. Согласно проведенному анализу данных следует вывод, что при безаварийной работе Белоярской АЭС и АО «ИРМ» существующие уровни техногенных радионуклидов в объектах окружающей среды городского округа Заречный (атмосферных осадках и выпадениях, воде водоемов, пищевых продуктов и др.) не оказывают значимого радиационного воздействия на проживающее на территории радиационного объекта население и объекты окружающей среды.

Междисциплинарные научные исследования Северского биофизического научного центра

Р.М. Тахауов^{1,2}, Д.Е. Калинин^{1,2}, И.В. Мильто^{1,2}

¹ ФГБУН «Северский биофизический научный центр» ФМБА России,
Северск, Томская область

² ФГБОУ ВО «Сибирский государственный медицинский университет»
Министерства здравоохранения Российской Федерации, Томск

Одной из приоритетных проблем радиационной медицины является изучение влияния и установление биологических эффектов хронического техногенного воздействия ионизирующего излучения (ИИ) на персонал объектов использования ИИ и населения зон наблюдения, решение которой способствует совершенствованию норм радиационной безопасности и снижению негативного влияния ИИ на здоровье человека.

Целью работы является обобщение научных исследований Северского биофизического научного центра (СБН Центр) в области радиационной эпидемиологии в период 2000-2022 гг.

Объектом научных исследований СБН Центра является население ЗАТО Северск и персонал объектов использования ИИ.

Основой для проведения научных исследований СБН Центра являются региональный медико-дозиметрический регистр, банк биологического материала, а также архив медицинской документации.

Оценка заболеваемости и смертности от злокачественных новообразований (ЗНО) персонала объектов использования ИИ и населения зон наблюдения показала отсутствие увеличения их риска при хроническом техногенном облучении в диапазоне "малых" доз.

В структуре онкологической заболеваемости мужского персонала объектов использования ИИ первое место занимают ЗНО органов пищеварительной системы, второе — дыхательной системы, третье — ЗНО кожи, четвёртое и пятое места — ЗНО органов мочевой и половой систем соответственно.

Среди женского персонала объектов использования ИИ первое место в структуре онкологической заболеваемости занимают ЗНО органов пищеварительной системы, второе — ЗНО молочной железы, третье — ЗНО органов половой системы, четвёртое — ЗНО кожи, пятое — ЗНО лимфоидной и кроветворной тканей.

Помимо этого, СБН Центр впервые в мире получил данные о значимой роли ИИ в сочетании с традиционными факторами риска развития ишемической болезни сердца в повышенной заболеваемости инфарктом миокарда персонала объектов использования ИИ. Установленный факт положен в основу создания комплексной программы диагностики и профилактики болезней системы кровообращения (БСК) у персонала объектов использования ИИ.

Исследования заболеваемости и смертности персонала объектов использования ИИ от БСК, например, инфаркта миокарда и артериальной гипертензии установили негативное влияние ИИ на стенку кровеносных сосудов, вызывающее активацию процессов перекисного окисления липидов и угнетение системы антиоксидантной защиты.

Исследователями СБН Центра установлено, что среди работников основных производств объектов использования ИИ, перенёсших инфаркт миокарда, достоверно чаще наблюдались гипертриглицеридемия, сахарный диабет и повышение концентрации С-реактивного белка в плазме крови, а также прослеживалась тенденция к большей частоте повышенного уровня психоэмоционального напряжения и курения в сравнении с работниками вспомогательных производств объектов использования ИИ, перенёсшими инфаркт миокарда.

Сравнение частот распространения традиционных факторов риска развития инфаркта миокарда (артериальная гипертензия, курение, гиподинамия, дислипидемия, ожирение, гиперхолестеролемиа) у работников, контактирующих в процессе производственной

деятельности с ИИ, выявило большую частоту некоторых из изученных факторов риска в сравнении с работниками, не контактирующими с ИИ.

Разработанная в СБН Центре современная стратегия профилактики неинфекционных социально значимых заболеваний среди работников объектов использования ИИ и населения зон наблюдения (на примере популяции ЗАТО Северск) включает в себя эффективную систему по выявлению патологических состояний, их своевременной коррекции и последующего мониторинга, что является инновационной формой работы по организации здравоохранения и укреплению общественного здоровья с целью увеличения продолжительности жизни и обеспечения профессионального долголетия.

Наиболее важным итогом эпидемиологических исследований СБН Центра является снижение заболеваемости и смертности от ЗНО и БСК среди персонала объектов использования ИИ, подвергавшегося долговременному техногенному профессиональному облучению ИИ, а также предотвращение социально-трудовых потерь, связанных с преждевременной смертностью и инвалидизацией.

Гигиеническая оценка защитных мероприятий при удалении отработавшего ядерного топлива с территории пункта временного хранения

А.В. Симаков, Ю.В. Абрамов, Н.Л. Проскуракова

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва
fmbc@fmbamail.ru

В 60-е годы прошлого века в губе Андреева на Кольском полуострове был создан пункт временного хранения (ПВХ) отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). В настоящее время он функционирует в составе Северо-западного центра СЗЦ «СевРАО». ПВХ обслуживал атомные подводные лодки и атомный ледокольный флот, осуществляя прием и хранение свежего и отработавшего ядерного топлива. Со временем защитные барьеры хранилищ ОЯТ частично утратили способность выполнять свои функции, что привело к загрязнению производственных помещений и территории отделения губа Андреева радиоактивными веществами выше допустимых значений.

Одним из основных источников радиоактивного загрязнения территории является бывшее хранилище ОЯТ бассейнового типа. В 1982 г. было зарегистрировано аварийное снижение уровня воды в левом бассейне, которое не удалось остановить. Дальнейшее поступление ОЯТ в хранилище было прекращено. В целях ликвидации последствий данной ситуации к 1985 г. большая часть ОЯТ была удалена из хранилища и перемещена в три переоборудованных сооружения — 2А, 2Б, 3А, получивших наименование «блоки сухого хранения» (БСХ).

Специалистами ГНЦ Института биофизики, ныне ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, в 2005 г. были проведены экспериментальные исследования параметров радиационной обстановки в сооружениях 2А, 2Б, 3А. Рассчитанное допустимое время работы персонала в производственных помещениях БСХ ограничено (от 10 до 50 рабочих смен в течение года). Разработанные специалистами ФМБЦ методические указания и рекомендации были в полном объеме учтены при разработке администрацией СЗЦ «СевРАО» мероприятий по обеспечению радиационной безопасности персонала. Для обеспечения безопасных условий работ по выгрузке ОЯТ из ячеек БСХ была создана соответствующая инфраструктура включая здание 153 — укрытие емкостей БСХ, предназначенное для обеспечения безопасных условий работы персонала при выгрузке ОЯТ из ячеек БСХ, загрузки ОТВС в специальные чехлы и формирования транспортных упаковочных комплектов. В здании 253 были проведены работы по снижению уровней мощности дозы внешнего излучения в блоках сухого хранения ОЯТ — демонтаж плит перекрытия и устройство горизонтальной биологической защиты (ГБЗ). Данная нормализация радиационной обстановки в помещениях БСХ снизила мощность амбиентного эквивалента дозы внешнего гамма-излучения в 100-400 раз.

В 2020 и 2021 гг. специалистами ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна совместно со службой радиационной безопасности объекта проведены экспериментальные исследования при обращении с ОЯТ в здании 153, которые показали, что реализация технических и организационных решений для защиты персонала от ионизирующих излучений предотвратила коллективные дозы облучения персонала порядка 12100 чел-мЗв/год.

**Анализ взаимосвязи между удельной активностью Ra-226
в строительных материалах и объемной активностью радона
в многоэтажных жилых зданиях**

И.В. Ярмошенко, Г.П. Малиновский, М.В. Жуковский, В.С. Изгагин,
А.Д. Онищенко, А.В. Васильев

ФГБУН «Институт промышленной экологии УрО РАН», Екатеринбург
ivy@ecko.uran.ru

По всему миру в настоящее время происходит рост доли многоэтажных энергоэффективных зданий в возводимом жилом фонде. Эта тенденция приводит к увеличению роли строительных материалов как источника облучения радоном в современной городской среде. В данном исследовании проанализирована взаимосвязь между содержанием Ra-226 в строительных материалах и объемной активностью радона внутри помещений в многоэтажных жилых зданиях. В девяти крупных российских городах были проведены измерения удельной активности естественных радионуклидов в строительных материалах в существующих жилых зданиях при помощи нового неразрушающего метода. Данные об объемной активности радона в этих же городах были получены в ходе ранее выполненных радоновых обследований с использованием радиометров радона на основе твердотельного трекового детектора. Удельная активность Ra-226, усредненная по различным типам строительных материалов, в выборке квартир в многоэтажных зданиях в обследованных городах составляет от 3,8 до 49 Бк/кг. Содержание Ra-226 в стройматериалах варьируется в зависимости от региона, года постройки здания и технологий строительства. С учетом нормирования на Ra-226 в строительных материалах объемная активность радона в новых энергоэффективных жилых зданиях в России в среднем в 2,1 раза выше, чем в многоквартирных зданиях, возведенных до 2000 года, с более низким классом энергоэффективности.

В многоэтажных жилых зданиях, построенных после 2000 г., с применением энергоэффективных технологий диффузионное поступление радона из строительных материалов, нормированное на удельную активность Ra-226, составило 0,5 (Бк/м³/ч)/(Бк/кг). Соответствующая скорость эксхалляции радона, нормированная на удельную активность Ra-226, равна 0,3 (Бк/м²/ч)/(Бк/кг). Современные тенденции урбанизации, предполагающие массовое строительство многоэтажных зданий, с одной стороны приводят к снижению поступления радона из почвы, а с другой — к увеличению вклада строительных материалов в облучение населения радоном. В новых энергоэффективных зданиях, не оборудованных механической системой вентиляции, создаются условия для накопления радона выше 100 Бк/м³ (референтный уровень ВОЗ) при относительно низких значениях удельной активности Ra-226 в строительных материалах, в которых эффективная удельная активность естественных радионуклидов ниже нормируемой величины. Следует рассматривать удельную активность Ra-226 в строительных материалах как отдельный фактор при проектировании новых зданий с низкой проницаемостью ограждающих конструкций и поднять вопрос о нормировании этой величины в рамках системы радиационной безопасности.

Радиационная безопасность населения: опыт и перспективы развития

Н.К. Шандала, Ю.Е. Квачева, Ю.В. Гущина, А.А. Шитова, И.И. Богданов

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва
nshandala@gmail.com

Современная методология радиационной гигиены, используемая в исследованиях по обеспечению радиационной безопасности населения, охватывает объекты и территории всех звеньев ядерно-топливного цикла России и базируется на проведении радиационно-гигиенического мониторинга. Исследовательские работы нацелены на совершенствование эколого-гигиенических основ радиационной защиты и безопасности населения, проживающего на территориях, обслуживаемых ФМБА России.

Радиоэкологические исследования в районах бывших береговых технических баз ВМФ на Северо-Западе и Дальнем Востоке России, а также предприятий, осуществляющих утилизацию атомных подводных лодок, позволили оценить воздействие радиационно-опасных объектов на окружающую среду и разработать регулирующие требования в области повышения радиационной безопасности на объектах ядерного наследия.

На территориях уранового наследия в Забайкалье, Ставрополье и в Центральной Азии изучено загрязнение объектов окружающей среды и оценены дозы облучения населения. Результаты исследований на территории Приаргунского горно-химического комбината в Забайкалье явились основанием для переселения населения из п. Октябрьский в г. Краснокаменск. Радиационно-гигиенический мониторинг, проводимый в регионе размещения выведенного из эксплуатации ПО «Алмаз» в г. Лермонтове, показал необходимость проведения реабилитационных работ в районах ряда штолен на горах Бештау и Бык. Разработанные нормативы реабилитации территорий урановых рудников России используются при исследовании радиационной обстановки на рекультивируемых урановых хвостохранилищах в Республиках Кыргызстан и Таджикистан.

Важное направление радиационной безопасности — противодействие ядерному и радиологическому терроризму. На основе обобщения многолетнего опыта радиобиологических и радио-токсикологических исследований, впервые в мире разработана уникальная методология ядерно-криминалистических экспертиз, заложившая основу нового научного направления — медицинской ядерной криминалистики.

Выполняя функции регулирования радиационной безопасности населения, разработан ряд методических рекомендаций по оценке радиационной безопасности населения и методические указания по контролю ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{238}U и др. радионуклидов в объектах окружающей среды и пищевых продуктах. Разрабатываемые документы имеют большое практическое значение в нормативно-методическом обеспечении надзорных мероприятий и мониторинга радиационных рисков.

Развиваются также инновационные методы построения информационно-аналитических систем радиационной безопасности, включающие разработку интерактивных карт с визуализацией результатов радиационно-гигиенического мониторинга.

Перспективные исследования по радиационной безопасности населения связаны с выполнением мероприятий ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности» и реализацией «Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности». В ближайшие годы приоритетными направлениями научных исследований являются:

- развитие технологий комплексного радиационно-гигиенического мониторинга состояния окружающей среды и изучения здоровья населения в регионах размещения радиационно-опасных объектов, включая разработку систем цифровизации радиационных и нерадиационных рисков;

- совершенствование нормативной базы обеспечения радиационной безопасности и защиты населения, а также методологии контроля радиационной обстановки с учетом требований новых международных нормативных документов;

- проведение комплексной радиационно-гигиенической оценки воздействия на окружающую среду в районах производств новых видов ядерного топлива;

- разработка новых технологий противодействия угрозам ядерного/радиологического терроризма с развитием медицинской ядерной криминалистики.

Радиационно-гигиенические аспекты обращения с телами умерших, загрязненными радиоактивными материалами

Ю.Е. Квачева, Н.К. Шандала

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

ulia_kvacheva@mail.ru

В настоящее время в Российской Федерации полномочия по аутопсийным исследованиям тел умерших людей, пострадавших вследствие радиационных инцидентов и аварий, а также погибших при обстоятельствах противоправного применения источников ионизирующего излучения (ИИИ) возложены на специализированные патологоанатомические и судебно-медицинские учреждения Федерального медико-биологического агентства (ФМБА России). Вскрытия радиоактивно загрязненных тел указанных категорий проводятся в помещениях специализированных прозектур обладающим необходимыми профессиональными компетенциями медицинским персоналом и регулируются ведомственными методическими документами ФМБА России, устанавливающими комплекс защитных радиационно-гигиенических мероприятий, включая использование средств и технологий коллективной и индивидуальной защиты, наличие и непрерывное функционирование системы дозиметрического контроля, планирование и проведение конкретных организационных мероприятий.

Вместе с тем, вопросы аутопсийных исследований еще одной («вновь возникшей») категории радиоактивно загрязненных трупов — тел умерших с инкорпорированными радиоактивными материалами медицинского назначения, количество которых прогрессивно увеличивается в связи с ростом масштабов внедрения в практику здравоохранения современных достижений ядерной медицины, остаются пока вне ведомственной юрисдикции, что формирует ситуацию правового «пробела» (т.е. отсутствия правового регулирования данной сферы деятельности, которая объективно требует регламентации и без обязательных для исполнения юридических норм не может функционировать нормально).

Так, содержащиеся в отдельных актах санитарного законодательства указания о необходимости проведения «в случае смерти пациента с имплантированными источниками излучения патологоанатомического вскрытия с их извлечением под радиационным контролем и передачей на пункт захоронения радиоактивных отходов в установленном порядке» оказались упущенными в действующих нормативных документах, регламентирующих деятельность патологоанатомической и судебно-медицинской служб РФ. В указанных документах отсутствуют необходимые нормативно-методические положения, касающиеся организации, проведения, дозиметрического и радиационно-гигиенического сопровождения секционных исследований «радиоактивных тел», особенно с учетом того обстоятельства, что такие исследования должны проводиться на базе неспециализированных танатологических отделений, персонал которых не обладает в достаточном объеме необходимыми знаниями, умениями и навыками радиационно-безопасных приемов и методов работы. Вне фокуса действующих в настоящее время нормативно-правовых актов остаются также вопросы радиационно-гигиенического сопровождения погребения в соответствии с обычаями конкретной местности (захоронение, кремация) тел умерших, загрязненных радиоактивными материалами.

Решение означенных вопросов представляется самостоятельным элементом обеспечения радиационной безопасности (предупредительный государственный санитарный надзор радиоактивного загрязнения окружающей среды и профессионального переоблучения персонала прозекторских служб и служб ритуального обслуживания), а в более широком понимании и элементом социальной безопасности (предупреждение социальной напряженности и протестной активности населения в контексте радиотревожных настроений в обществе), включая противодействие радиологическому терроризму (исключение «радиоактивных тел» из числа возможных объектов преступного посягательства для завладения ИИИ в террористических целях).

**Развитие и совершенствование системы ИДК
профессионального внутреннего облучения.
Научно-практический опыт ФГБУН ЮУриБФ ФМБА России**

А.Б. Соколова, А.В. Ефимов, К.Г. Сулова

ФГБУН «Южно-Уральский институт биофизики» ФМБА России,
Озерск, Челябинская область
ephimov@subi.su

Южно-Уральский институт биофизики проводит фундаментальные и прикладные исследования во многих областях, связанных с радиационной безопасностью.

Необходимо отметить многолетнюю практическую деятельность института, в рамках которой выполняется индивидуальный дозиметрический контроль внутреннего облучения персонала ФГУП «ПО «Маяк». Ежегодно в лаборатории № 3 ЮУриБФ выполняется более 2000 обследований биофизическим методом и более 1800 обследований на установках СИЧ. При выполнении ИДК используется два метода — биофизическое обследование и измерения на установках СИЧ. Особое внимание уделяется процедуре проведения специального (аварийного) ИДК. Случаи острого поступления актинидов фиксируются даже в последние десятилетия. Это работники, сразу направленные на обследование после возникновения нештатной ситуации, а также случаи, выявленные при проведении текущего ИДК.

В настоящее время при проведении и текущего, и специального ИДК в лаборатории № 3 применяется широкий ряд методов контроля. Первый из них, самый быстрый, это метод измерения на установке СИЧ (спектрометр излучения человека). Метод позволяет измерять активность Am-241 в легких, и в основном используется как индикаторный. Плановые обследования персонала ФГУП «ПО «Маяк» на установках СИЧ были начаты в 1980-х годах. В начале 2000-х гг. в лаборатории № 3 введены в эксплуатацию спектрометры излучения человека, оснащенные детекторами из высокочистого германия. Для выполнения ИДК были разработаны, аттестованы, внедрены и реализуются все необходимые методики.

Лаборатория № 3 приступила к измерениям содержания плутония в моче у работников ФГУП «ПО «Маяк» в 1953 году, для измерений использовался альфа-радиометрический метод. Плановые биофизические обследования работников ФГУП «ПО «Маяк» начались в 60-х годах. Из-за несовершенства радиохимических методов обследование персонала проводили с использованием лечебных средств, увеличивающих уровень экскреции с мочой, таких как пентацин и цинкацин. В середине 70-х была внедрена новая более совершенная система ИДК.

В 1998 году в лаборатории № 3 начали выполнять измерения с использованием альфа-спектрометра. В последние годы в качестве более чувствительного метода измерения активности радионуклидов в биосубстратах все большее распространение находит метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС).

Организация проведения обследований менялась с течением времени: до 1975 г. около 90 % всех обследований выполнялись с использованием хелатостимуляции, независимо от уровней поступления; затем, совершенствование методов радиохимического анализа и методов измерения позволило анализировать естественные уровни экскреции плутония. До начала 2000-х гг. обследование работников проходило в условиях стационара и включало обязательный сбор не менее трех суточных количеств мочи. В настоящее время при обследовании собирается только одна проба мочи, сбор происходит амбулаторно, что связано со значительным увеличением количества обследуемых работников.

Исследования в области биокинетики, разработки и последовательного совершенствования биокинетических моделей являются приоритетными направлениями работы лаборатории № 3 с начала ее деятельности и вплоть до настоящего времени. Накопленные в лаборатории № 3 данные многолетних наблюдений за работниками

ФГУП «ПО «Маяк» и населения прилегающих территорий являются ценнейшим источником информации для проведения таких исследований.

Первые этапы работы по созданию и совершенствованию дозиметрических систем работников ФГУП «ПО «Маяк» представлены в трех последовательно подготовленных модификациях — Дозы-1999, Дозы-2000 и Дозы-2005. В рамках работы по совместному российско-американскому проекту, посвященному развитию и совершенствованию дозиметрии, были разработаны дозиметрические системы MWDS-2008, MWDS-2013, MWDS-2016 и MWDS-2019.

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

Всего за период деятельности лаборатории № 3 создано более 400 отчетных и методических документов, опубликовано более 400 статей и монографий, выполнено 10 диссертационных работ. Следует особо отметить, что результаты исследований, проделанных сотрудниками лаборатории № 3, получили широкое признание мирового научного сообщества: в Публикации 141 серии OIR (the Occupational Intakes of Radionuclides) МКРЗ были использованы работы по метаболизму изотопов плутония америция-241, выполненные сотрудниками лаборатории № 3.

Биологическая дозиметрия трития при смешанном облучении

С.В. Осовец, Т.В. Азизова, Н.В. Сотник

ФГБУН «Южно-Уральский институт биофизики» ФМБА России,
Озерск, Челябинская область
clinic@subi.su

В настоящее время наиболее изученными являются биомаркеры внешнего острого облучения, для которых установлены статистически значимые зависимости доза-эффект, в то время как при внутреннем хроническом облучении человека, например, таким изотопом, как тритий, аналогичные данные представлены сравнительно немногочисленными публикациями.

Цитогенетические методы активно используются при исследовании влияния трития и его соединений на организм человека. В качестве основного цитогенетического метода изучения эффектов трития на биологические объекты используется анализ частоты хромосомных aberrаций (транслокаций) в лимфоцитах периферической крови.

Персонал ПО «Маяк», который в процессе производственной деятельности контактировал с тритием и его соединениями и подвергался внутреннему облучению бета-частицами, в большинстве случаев подвергался и внешнему гамма-облучению в широком диапазоне доз. В связи с этим, оценка дозы внутреннего облучения от инкорпорированного трития с помощью цитогенетических маркеров вызывает определенные методологические трудности.

В настоящей работе представлен метод оценки накопленной дозы внутреннего облучения от инкорпорированного трития на основе комплексной биодозиметрической системы, включающей данные по частоте транслокаций и суммарной дозы внешнего гамма-облучения.

Для оценки поглощенной в мягких тканях (МТ) дозы внутреннего бета-излучения от инкорпорированного трития методом биологической дозиметрии используется математическая модель вида:

$$D_{\beta} = \frac{Z - a - b_{\gamma} D_{\gamma}}{b_{\beta}}, \quad (1)$$

где D_{γ} — суммарная поглощенная в МТ доза внешнего гамма-облучения; D_{β} — накопленная поглощенная в МТ доза внутреннего бета-излучения; a , b_{γ} , b_{β} — параметры модели; Z — частота транслокаций.

При расчетах по формуле (1) должны выполняться ограничения: $0 \leq D_{\gamma} \leq 1$ Гр; $0 \leq D_{\beta} \leq 1$ Гр; $a = 0,3$; $b_{\gamma} = 3,10$ (Гр⁻¹); $b_{\beta} = 2,60$ (Гр⁻¹); $0,4 \leq Z \leq 6,2$.

Методология построения биодозиметрической системы основывается на допущении, что результаты цитогенетических исследований, полученные *in vitro*, при длительном внешнем гамма-облучении и бета-облучении НТО лимфоцитов периферической крови человека, являются хорошим модельным приближением для построения комплексной биодозиметрической системы с последующей оценкой поглощенных доз от воздействия бета-излучения трития на МТ организма.

Результаты исследований по частоте транслокаций при воздействии внешнего гамма-излучения и трития на лимфоциты человека *in vitro* (Morrison D.P., et al.) представлены на рисунке 1.

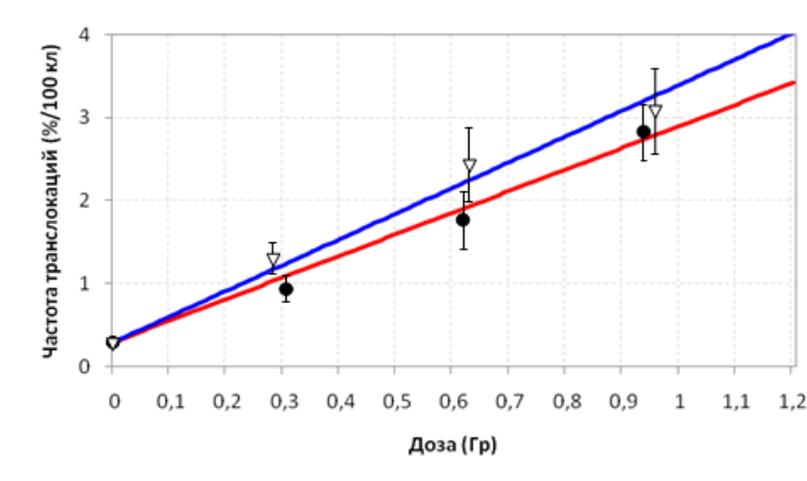


Рисунок 1. Линейные зависимости частоты транслокаций от дозы гамма-излучения (▽) и дозы бета-излучения (●).

Зависимости, представленные на рисунке 1, аналитически описываются следующими регрессионными уравнениями:

$$Z_{\beta} = (0,30 \pm 0,10) + (2,60 \pm 0,20)D, \quad (2)$$

$$Z_{\gamma} = (0,30 \pm 0,12) + (3,10 \pm 0,10)D. \quad (3)$$

С помощью этих регрессий была построена комплексная биодозиметрическая система (1), которая позволяет в диапазоне от 0 до 1 Гр оценить индивидуальные накопленные дозы облучения, при хроническом внутреннем облучении тритием в условиях сочетанного облучения (внешнего гамма-облучения и внутреннего бета-облучения).

Величина Z (частота транслокаций) является результатом независимого воздействия на лимфоциты человека внешнего источника гамма-излучения и внутреннего бета-излучения от инкорпорированного трития. При этом вклад каждого типа излучения в суммарную частоту аберраций является случайной величиной, в связи с чем, при расчете доз от внутреннего бета-облучения учитывали все возможные комбинации, а также указанные выше ограничения.

Используя предложенный метод биологической дозиметрии на основе комплексной биодозиметрической системы с учетом порога чувствительности ~ 40 мГр, можно определить поглощенную дозу облучения у персонала, подвергшегося внутреннему бета-облучению от инкорпорированного трития, в диапазоне от 0,04 до 1 Гр. При этом относительная стандартная неопределенность оценок индивидуальных доз облучения составляет в среднем $\sim 25 - 30$ %.

Разработка алгоритмов искусственного интеллекта для задач ретроспективной дозиметрии внутреннего облучения

А.Б. Джунушалиев, А.Б. Соколова, А.В. Ефимов

ФГБУН «Южно-Уральский институт биофизики» ФМБА России,
Озерск, Челябинская область
ephimov@subi.su

Наиболее эффективным методом контроля доз внутреннего облучения, обусловленного поступлением плутония, является метод косвенной дозиметрии, основанный на интерпретации результатов радиохимических измерений нуклида в экскретах. К сожалению, к настоящему времени существенное количество работников ФГУП «ПО «Маяк», подвергшихся воздействию ионизирующего излучения в первые годы работы предприятия, не обеспечены данными индивидуальных обследований.

В настоящем исследовании с использованием подходов машинного обучения получена модель, способная предсказать величину суточной экскреции плутония с мочой по данным об истории профессиональной деятельности работника ФГУП «ПО «Маяк» и дате сбора пробы суточного количества мочи (СКМ). На этапе предобработки данных применялось бинарное кодирование существующих и ввод двух новых признаков (столбцов), после чего строки этих данных разбивались на тренировочные, валидационные и тестовые в соотношении 4:1:1; а обучение модели проводилось алгоритмом градиентного бустинга с основой в виде решающих пней. Функция оценки качества для этой задачи — минимум суммы квадратов разностей для логарифмированных значений активности плутония в СКМ.

В итоге был получен алгоритм предобработки данных и обучения модели для когорты работников ФГУП «ПО «Маяк». Продемонстрированный подход позволяет получить модель, оценивающую активность плутония в СКМ по данным об истории профессиональной деятельности работника. Среднее стандартное отклонение ошибки модели равно 0,501 при разбросе логарифма измеренной активности плутония в СКМ от -9,078 до 3,607.

Обмен цезия-137 между клетками и экстрацеллюлярной жидкостью

В.Э. Введенский

ФГБУН «Южно-Уральский институт биофизики» ФМБА России,
Озерск, Челябинская область
Vvedensky@subi.su

Аннотация. На основе литературных данных и результатов собственных исследований о метаболизме цезия-137 в организме человека разработана модель клеточной проницаемости, описывающая обмен радионуклида между клетками и экстрацеллюлярной жидкостью при различных ритмах поступления нуклида в организм. Определены градиенты концентрации в системе клетки – внеклеточная жидкость. Оценены скорость поглощения и периоды полувыведения элемента из клеток трёх типов, различающихся уровнями накопления, оценены электрические потенциалы клеточных мембран. Обсуждается отличие предложенного подхода от рекомендуемого Публикацией 137 МКРЗ при оценке метаболизма инкорпорированного цезия-137.

Ключевые слова: цезий-137, метаболизм, моделирование, камерная модель, внутренняя дозиметрия.

Актуальность проблемы. Радионуклид цезий-137 выделяется среди продуктов деления урана высоким выходом на одно деление и длительным периодом полураспада. В результате испытаний атомного оружия в атмосфере этот радионуклид обнаружен глобально в различных объектах окружающей среды и в организме человека уже в начале 50-х годов. В более поздние сроки повышенный интерес к радиационным и токсикологическим свойствам этого нуклида вызван региональными выбросами радиоактивности, обусловленными авариями на ЧАЭС и на Фукусиме. Развитие атомной энергетики увеличивает потенциальную угрозу облучения человека радионуклидами техногенного происхождения, что делает актуальным углубленное изучение их метаболизма.

Модели метаболизма цезия-137, доступные в настоящее время:

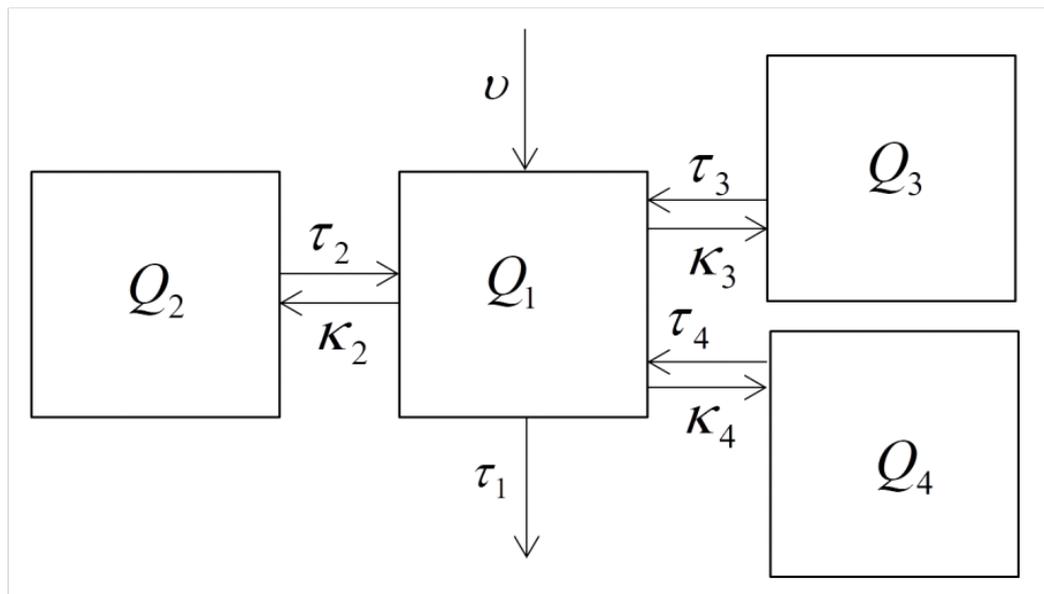
- 1979 г. — двуэкспоненциальная модель;
- 2003 г. — модель Leggett et al;
- 2017 г. — публикации 137 МКРЗ.

Модель Леггетта и модель из Публикации 137 МКРЗ — это фактически одна и та же модель. Эти модели несколько различаются структурой.

Недостаток доступных моделей метаболизма цезия-137. У всех представленных моделей есть недостаток — эти модели корректно описывают поведение цезия-137 в организме человека по истечению некоторого времени после поступления (порядка десяти-пятнадцати минут для моделей 2003, 2017). Таким образом, актуальной задачей является нахождение приемлемой модели метаболизма цезия-137, которая бы адекватно описывала поведение цезия-137 в организме взрослого мужчины с момента поступления.

Материалы и методы. Предложенная в данном сообщении система уравнений обмена между клетками разных органов по форме совпадает с уравнениями моделей (2003, 2017). Однако в основу моделей (2003, 2017) заложен иной подход, а именно, принцип макроскопического перемещения нуклида между органами и тканями с потоком плазмы, а отложение в них определяется с помощью специфических коэффициентов экстракции элемента из плазмы.

Предложенная камерная модель цезия-137 системы клетки — внеклеточная жидкость:



- Q1 — активность цезия-137 в экстрацеллюлярной жидкости;
- Q2 — активность цезия-137 в клетках мышц;
- Q3 — активность цезия-137 в клетках прочих органов и тканей;
- Q4 — активность цезия-137 в жировых клетках.

Отличие предложенной модели цезия-137 от доступных моделей:

- Предложенная модель моделирует клеточную проницаемость и описывает обмен радионуклида между клетками и экстрацеллюлярной жидкостью. Доступные модели или описывают содержание цезия во всем организме (1979), или описывают поведение цезия на «органном» уровне (2003, 2017);

- Предложенная модель адекватно описывает поведение цезия-137 в организме взрослого мужчины с момента поступления в отличие от доступных в настоящее время моделей, которые корректно описывают поведение цезия-137 в организме человека по истечению некоторого времени после поступления.

Мембранные потенциалы. Согласно представлениям современной молекулярной биологии активный транспорт ионов калия через мембрану в направлении против градиента концентрации осуществляется в основном благодаря действию электрически заряженной мембраны клеток. Работа по перемещению иона через мембрану определяется величиной электрического потенциала мембраны по отношению к межклеточной жидкости. Вычисления показывают, что мембранные потенциалы клеток по отношению к внеклеточной жидкости для цезия-137 и для калия в среднем по организму составили соответственно $E_{\text{цезия}} = -77$ мВ и $E_{\text{калия}} = -81$ мВ при температуре 37 °С.

Недостаток предложенной модели. Ограниченность модели состоит в том, что в ней не затрагивается вопрос об экскреции. Учет экскреции повысит корректность описания процессов обмена.

Заключение:

- В настоящей работе, как и в публикациях других авторов, показано, что в действительности у млекопитающих вместо гомогенного распределения реализуется медленно меняющееся во времени негетерогенное распределение по органам. Макроскопическая гетерогенность особенно выражена в поздний период после однократного поступления;

- Рассмотрен новый подход к количественному описанию поведения цезия в целом организме с позиции теории клеточной проницаемости;

- Предложенная модель адекватно описывает поведение цезия-137 в организме взрослого мужчины с момента поступления.

Вывод. Представляется, что способ моделирования клеточной проницаемости, приведенный в данном сообщении, следует рассматривать как новый подход с позиций физиологии к решению проблемы, развитие которого может оказаться полезным или даже конкурирующим с подходом, используемым в моделях (2003, 2017). [Результаты частично опубликованы в ВРБ №2 2023.](#)

Дозиметрия красного костного мозга от инкорпорированных бета-излучателей

П.А. Шарагин, Е.И. Толстых, Е.А. Шишкина, М.О. Дегтева

ФГБУН «Уральский научно-практический центр радиационной медицины» ФМБА России,
Челябинск
sharagin@urcrm.ru

Попадание бета-излучающих радионуклидов в организм человека приводит к облучению внутренних органов и тканей. Некоторые радионуклиды способны накапливаться в минерализованной костной ткани, что приводит к облучению одного из самых радиочувствительных органов — красного костного мозга (ККМ). Наиболее опасными остеотропными радионуклидами являются $^{89,90}\text{Sr}$. Именно они были основными источниками внутреннего облучения ККМ для жителей прибрежных территорий реки Течи. В современной практике радиационной защиты дозиметрия остеотропных бета излучателей включает в себя биокинетическое и дозиметрическое моделирование. Биокинетическое моделирование применяется для оценки удельной активности радионуклида в ткани-источнике (кости), а дозиметрическое моделирование — для оценки коэффициентов перехода от удельной активности к дозе (DF), поглощенной в ККМ. Дозиметрическое моделирование подразумевает создание вычислительных фантомов, имитирующих среды, в которых будет проводиться имитация транспорта излучений, т.е. костную ткань и ККМ.

Современные вычислительные фантомы состоят из множества объёмных элементов-вокселей. Сегодня существуют разные способы построения вычислительных фантомов, на основе анализа КТ и микро-КТ изображений аутопсийного материала. Создание таких фантомов — дорогостоящий и трудоемкий процесс, а из-за использования ограниченного количества патологоантомического материала, эти модели не позволяют оценить неопределенности, связанные с популяционной изменчивостью организма. Наиболее известными фантомами, построенными с использованием данной методики, являются фантом скелета новорожденного, созданный в университете Флориды и фантомы скелета взрослого человека представленные в публикации МКРЗ-133. В качестве альтернативы, в УНПЦ РМ был создан оригинальный метод стохастического параметрического моделирования костных структур (SPSD-моделирование). Параметры СПSD фантомов основаны на результатах анализа большого количества опубликованных данных, что позволяет оценить популяционную вариабельность параметров фантомов и как следствие вариабельность DF . Данная работа представляет результаты применения СПSD — подхода, и их сравнение с опубликованными результатами дозиметрического моделирования, полученными другими исследователями.

Целью данной работы является оценка коэффициентов перехода для ККМ от инкорпорированного ^{90}Sr для следующих возрастных групп: новорожденный, 1-год, 5-лет, 10-лет, 15-лет (мужчина и женщина), взрослые (мужчина и женщина). А также их сравнение с результатами дозиметрического моделирования скелета, представленными в МКРЗ-133 и с DF , полученными в университете Флориды.

В рамках СПSD подхода моделировались только участки скелета с активным гемопоэзом. Каждый такой участок был разделен на небольшие сегменты, описываемые простыми геометрическими формами. Параметры сегментов получены на основе опубликованных и включали линейные размеры костей и характеристики костной микроархитектуры, при этом оценивались не только их средние значения, но и популяционная вариабельность. На основе этих параметров для каждого сегмента был сгенерирован воксельный фантом, который внутри заполнен спонгиозой, включающей трабекулярную кость и ККМ. Снаружи фантом покрыт плотным слоем кортикальной кости. Для имитации популяционной вариабельности размеров и микроструктуры скелета для каждого фантома со средними значениями параметров, было сгенерировано 12 дополнительных фантомов со случайно разыгранными параметрами в пределах их популяционной вариабельности.

Имитация транспорта излучений проводилась с использованием метода Монте-Карло, в программе MCNP 6.2.

Были сгенерированы фантомы участков скелета с активным гемопоэзом и получены DF для следующих возрастных групп: новорожденный, 1-год, 5-лет, 10-лет, 15-лет (мужчина и женщина), взрослые (мужчина и женщина). В результате дозиметрического моделирования, для каждой возрастной группы были получены значения DF в диапазоне $4,02 \times 10^{-11}$ - $5,45 \times 10^{-11}$ Гр/с на Бк/г для Sr, инкорпорированного в трабекулярной кости и $1,03 \times 10^{-11}$ - $2,39 \times 10^{-11}$ Гр/с на Бк/г — для Sr в кортикальной кости. Неопределенности DF были в диапазоне 26 – 64 %. Значения DF , опубликованные МКРЗ и университетом Флориды для Sr в кортикальной кости, превышали таковые, полученные для SPSSD-фантомов в 1,7 раз. Результаты дозиметрического моделирования для стронция в трабекулярной кости, рассчитанные для опубликованного фантома новорожденного в 1,4 раза больше, чем для SPSSD-фантома, DF для фантомов взрослых людей, представленных в МКРЗ-133, наоборот, меньше, чем для SPSSD-фантомов в 1,4-1,5 раз (в зависимости от пола). Полученные результаты моделирования будут использованы для усовершенствования дозиметрической системы реки Теча. Представленные вычислительные фантомы могут быть использованы для дозиметрии других остеотропных бета-излучающих радионуклидов. Работа выполнена в рамках реализации федеральной целевой программы "Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016-2020 годы и на период до 2035 года»" и при финансовой поддержке Федерального медико-биологического агентства России.

Системное обоснование развития двухкомпонентной ЯЭ на базе РБН с учетом радиационно-эквивалентного подхода к обращению с РАО

В.К. Иванов, В.М. Соломатин, Е.В. Спирин

Акционерное общество «Прорыв», Москва
svm@proryv2020.ru

Электроэнергия, производящаяся в настоящее время на атомных станциях, составляет небольшую часть ее общемирового производства. Хотя ядерное топливо имеет наиболее высокую удельную энергию на единицу массы, проблемы обращения с ОЯТ современных реакторов на тепловых нейтронах (ТР) существенно тормозят дальнейшее развитие ядерной энергетики (ЯЭ).

Развитие двухкомпонентной ЯЭ в виде ТР и реакторов на быстрых нейтронах, работающих в замкнутом ядерном топливном цикле, может принципиальным образом снизить опасность ЯЭ.

МКРЗ с учетом результатов текущих крупномасштабных радиационно-эпидемиологических исследований рекомендовала оценивать уровень радиологической защиты населения и персонала в терминах величины пожизненного обусловленного риска (LAR).

При умеренных темпах технологического развития ЯЭ России в сценарных исследованиях предполагается достичь к 2100 г. установленную электрическую мощность на уровне 70 ГВт. Установленная мощность может быть достигнута с использованием разных типов реакторов — есть зона неопределённости в принятии решений и уровня развития ядерных технологий, которая может быть заполнена использованием только реакторов на быстрых нейтронах (быстрых реакторов, БР), только реакторов на тепловых нейтронах (тепловых реакторов, ТР), либо сочетанием этих типов реакторов. В настоящей работе было рассмотрено 4 возможных сценария: 1 — полный переход на БР, следующие три сценария рассматривали различные технологии в зоне неопределённости: 2 — с использованием только БР, 3 — с использованием только ТР и 4 — с ТР и БР с одинаковой долей по выработке электроэнергии.

Таблица 1. Время достижения радиологической эквивалентности в зависимости от возможных сценариев развития ЯЭ.

Сценарии развития ЯЭ	Достижение радиологической эквивалентности, лет	
	LAR	ПБО
Сценарий 1	99	287
Сценарий 2	412	3 373
Сценарий 3	12 277	46 856
Сценарий 4	1 966	23 058

В рамках новых моделей «доза-эффект» МКРЗ установлено, что эффект радиологической эквивалентности, когда выравниваются радиационно-обусловленные канцерогенные риски РАО и природного уранового сырья, достигается в диапазоне от 100 до 12000 лет выдержки в зависимости от сценария (таблица 1). При этом показано, что наступление радиационно-миграционной эквивалентности, т.е. вырывание эффективных доз, происходит в более широких диапазонах от 300 до 47000. Полученные данные позволяют сделать принципиальное заключение, что с позиций современных стандартов радиологической защиты населения по минимизации потенциальных канцерогенных эффектов радиационного воздействия на население приоритет в развитии ЯЭ в стране должен быть отдан сценарию 1 или 2, при котором фактор неопределённости полностью замещается БР.

2. Отдаленные последствия ионизирующих излучений

Оптимизация протоколов компьютерно-томографических исследований для новорожденных пациентов на примере фантомного исследования для компьютерного томографа Ingenuity 128, Philips

П.С. Дружинина¹, Л.А. Чипига¹, И.Г. Шацкий¹, А.В. Водоватов^{1,2}, А.В. Поздняков², В.Г. Пузырев², А.И. Тащилкин², Д.А. Маликов², Н.Н. Потрахов³, Ю.Н. Потрахов³

¹ ФБУН «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева» Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург

² ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург

³ ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург

druzhininapauline@gmail.com

Актуальность. Учитывая высокую чувствительность детей к ионизирующему излучению, при использовании метода компьютерной томографии (КТ) для диагностики новорожденных пациентов в педиатрии особое внимание следует уделять снижению доз облучения пациентов и оптимизации протоколов КТ-исследований [1]. При этом оптимальные параметры протокола сканирования должны обеспечивать необходимое для диагностики качество получаемого изображения при наименьшей дозе облучения пациента [1-3].

Цель исследования. Изучить влияние параметров протоколов КТ-сканирования на дозу пациентов и качество изображения, с целью оптимизации протоколов сканирования для новорожденных пациентов (от 0 до 1 года) на компьютерном томографе Ingenuity 128, Philips.

Материалы и методы. В работе был использован антропоморфный фантом новорожденного ребенка PH-50 Newborn Whole Body Phantom. Для оптимизации были выбраны три протокола: органов грудной клетки (ОГК), органов брюшной полости (ОБП) и совмещенный ОГК + ОБП. Для оценки уровней облучения пациентов использовались значения эффективной дозы, оценку качества КТ-изображения проводили по параметру шум изображения. Шум КТ-изображения определялся:

- для протокола ОГК в мягких тканях в зоне плечевого пояса и диафрагмы на изображениях с ядром реконструкции В и в легочной ткани в зоне верхушек легких для изображений с ядром реконструкции УС;

- для протокола ОБП в мягких тканях в зоне диафрагмы на изображениях с ядром реконструкции В.

- для протокола ОГК+ОБП в мягких тканях в зоне плечевого пояса и диафрагмы на изображениях с ядром реконструкции В и в легочной ткани в зоне верхушек легких для изображений с ядром реконструкции УС;

В качестве базовых были приняты параметры КТ-протоколов, установленные производителем: ОГК — 80 кВ, DRI — 12; ОБП — 100 кВ, DRI — 18; ОГК + ОБП — 120 кВ, DRI — 18. Для оптимизации протоколов значения напряжения и дозового индекса (DRI) изменялись в диапазонах: ОГК — 80 и 100 кВ, DRI — 12/15/19; ОБП — 80 и 100 кВ, DRI — 18/20/22; ОГК + ОБП — 100 и 120 кВ, DRI — 18/20/22.

Значения эффективной дозы были рассчитаны с использованием программного обеспечения NCICT 3.0.

Результаты. Для протоколов ОГК и ОБП увеличение значений напряжения и DRI приводило к снижению шума КТ-изображений всех исследуемых анатомических областей, при этом возрастала эффективная доза. Для протокола ОГК+ОБП уменьшение значений напряжения и DRI приводило к увеличению шума и снижению качества изображения в мягких тканях диафрагмы и верхушках легких, при этом эффективная доза снижалась.

В результате были определены оптимальные параметры протоколов КТ-сканирования: ОГК — 80 кВ при DRI — 19, ОБП — 100 кВ при DRI — 22, ОГК + ОБП — 100 кВ при DRI — 22, которые обеспечивают эффективную дозу облучения новорожденных пациентов 1,4 мЗв, 1,7 мЗв и 2,8 мЗв, соответственно.

Заключение. На основании проделанной работы были определены оптимальные значения напряжения и DRI, которые обеспечивают изображения хорошего качества с низким уровнем шума.

Список литературы:

1. Дружинина П.С., Чипига Л.А., Шацкий И.Г., Водоватов А.В., Поздняков А.В., Пузырев В.Г., Тащилкин А.И., Маликов Д.А., Потрахов Н.Н., Потрахов Ю.Н. Оптимизация протоколов компьютерно-томографических исследований для новорожденных пациентов на примере фантомного исследования с компьютерным томографом Ingenuity 128, Philips//Медицинская физика — 2022. — 43 с.

2. Chipiga L.A., Vodovatov A.V., Berkovich G.V., Trufanov G.E. Comparison of different approaches for image quality assessment in computer tomography. AIP Conference Proceedings. 7. "7th International Conference on X-Ray, Electrovacuum and Biomedical Technique" 2021. P. 020005.

3. Дружинина П.С., Чипига Л.А., Рыжов С.А., Водоватов А.В., Беркович Г.В., Смирнов А.В., Ярына Д.В., Ермолина Е.П., Дружинина Ю.В. Современные подходы к обеспечению качества диагностики в компьютерной томографии. Радиационная гигиена. — 2021. — 14(1). — 17-33. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2021-14-1-17-33>.

**Состояние слизистой оболочки желудка
среди персонала радиационно опасного производства,
контактирующего с тритием, по результатам серологического скрининга**

С.В. Поволоцкая, С.С. Сокольникова, О.В. Кузьменко

ФГБУН «Южно-Уральский институт биофизики» ФМБА России,
Озерск, Челябинская область
povolotskaja@subi.su

Исследований влияния Н³ на гастродуоденальную систему человека не много, практически все выполнены при облучении в высоких дозах. В отдаленные сроки у персонала, работавшего с соединениями трития и подвергавшегося дозам, значительно превышавшим допустимый предел, развивались глубокие изменения в слизистой оболочке желудка (СОЖ), значительно чаще выявлялись признаки предраковой патологии — атрофического гастрита с кишечной метаплазией.

Целью настоящего исследования была оценка состояния СОЖ у персонала химического завода ПО «Маяк», контактирующего с соединениями трития в регламентных условиях, с использованием биомаркеров ферментативной и гормональной функции желудка. К обследованию были привлечены работники, занятые на производственных операциях с большими радиационными дозами. Группа состояла из 147 чел., в возрасте на момент обследования $43,1 \pm 0,7$ лет (30-70 лет), со стажем работы $15,7 \pm 0,8$ лет, 70 % в группе составляли мужчины, 80 % технический персонал. Для оценки состояния СОЖ использовался неинвазивный метод «серологической биопсии», включавший определение в сыворотке крови содержание ключевых биомаркеров, определяющих структуру и функцию СОЖ — пепсиногенов (ПГ1 и ПГ2) (маркеры ферментативной функции), базального гастрин-17 (Г-17) (маркер гормональной функции), антител к бактерии *H. pylori* (АТНр) (инфицированность СОЖ). Оценка проводилась в соответствии с диагностическими профилями тест-системы «ГастроПанель» (Biohit, Финляндия).

Серопозитивность в группе составляла 58,5 %, у женщин была выше в 1,4 раза по сравнению мужчинами (76 % и 53 %) соответственно, ОШ 2,3; 95 % ДИ 1,8-3,0). Инфицированность Нр увеличивалась с возрастом с 39 % (30-40 лет) до 77 % у лиц старше 50 лет (ОШ 5,1; 95 % ДИ 3,6-7,3), со стажем работы с 51 % до 77 % (стаж более 20 лет) (ОШ 4,7; 95 % ДИ 3,7-5,9). Частота серопозитивности у технического персонала достоверно превышала этот показатель среди руководящих работников (ОШ 1,8; 95 % ДИ 1,2-2,8). Инфицированность Нр ассоциировалась с более высокими уровнями ПГ1, ПГ2 и Г-17.

Средние уровни биомаркеров в зависимости от инфицированности H. pylori

Варианты	Ср. возраст, лет	Биомаркеры, М ± m		
		ПГ1 мкг/л	ПГ2 мкг/л	Г-17 пмоль/л
Нр-	$39,4 \pm 1,0$	$89,6 \pm 4,5$	$12,1 \pm 0,9$	$6,6 \pm 1,4$
Нр+	$45,7 \pm 0,9$	$111,3 \pm 5,5^*$	$23,8 \pm 1,5^*$	$11,9 \pm 1,5^*$
* отличия между Нр+ и Нр- группами статистически значимы, $p \leq 0,05$				

Среднегрупповые значения уровня биомаркеров СОЖ не отличались от референтного диапазона и серологических показателей, полученных в других исследованиях, выполненных с использованием «ГастроПанели». По результатам скрининга доля лиц со здоровой СОЖ составляла 40 %. Серологические признаки Нр-ассоциированного воспаления СОЖ наблюдались в 54,5 % случаев, чаще встречались у женщин (ОШ 3,0; 95 % ДИ 2,3-4,0), у лиц в возрасте старше 40 лет (ОШ 3,4; 95 % ДИ 2,4-5,0), у стажированных работников (стаж более 20 лет) (ОШ 2,3; 95 % ДИ (1,7-3,0), у технического персонала (ОШ 1,7; 95 % ДИ 1,1-2,6). Признаки тяжелой атрофии СОЖ (ПГ1 <30мкг/л, Г-17 <1пмол/л) с высоким риском рака

желудка встречались у 5,5 % работников. Зависимости атрофии от пола, возраста, стажа работы, профессии выявлено не было. Высокая кислотная продукция в теле желудка (ПГ1 >160 мкг/л) (риск эрозивно-язвенных поражений) регистрировалась у 9,5 % работников, повышаясь с 5 % среди более молодых до 13 % у лиц старше 40 лет, независимо от пола. Частота выявления серологических признаков патологии СОЖ в изученной группе не превышала отечественных показателей.

Риск онкологических заболеваний у населения, облученного на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа, за 57-летний период наблюдения

С.С. Силкин, Л.Ю. Крестинина

ФГБУН «Уральский научно-практический центр радиационной медицины» ФМБА России,
Челябинск
ssilkin@urcrm.ru

Изучение влияния ионизирующего излучения в диапазоне малых доз (до 100 мГр) на здоровье населения в отдаленные сроки после облучения является одной из основных задач современной радиационной эпидемиологии.

Целью данного исследования было изучение канцерогенных эффектов хронического внешнего и внутреннего облучения в диапазоне малых доз у населения Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРСа) на основе анализа риска развития заболеваний и смерти от злокачественных опухолей (ЗО).

В конце сентября 1957 года на ПО «Маяк» произошла авария, в результате которой образовался ВУРС, что в последствии привело к хроническому облучению населения, проживающего на его территории.

В КВУРС были включены люди, родившиеся и/или проживающие в одном из населенных пунктов на ВУРСе в период с даты аварии (29 сентября 1957 года) до начала 1960 года.

Территория наблюдения за смертностью включала Челябинскую и Курганскую области, территория наблюдения за заболеваемостью была ограничена 5 районами Челябинской области (Сосновский, Аргаяшский, Каслинский, Красноармейский и Кунашакский), городами Челябинском и Озерском, где была возможность сбора информации об онкологических заболеваниях или причинах смерти за период с 1957 по 2014 годы.

Около 2 тысяч человек, вошедших в изучаемую когорту ВУРСа (КВУРС), до аварии 1957 года получили облучение при проживании в населенных пунктах на берегах реки Течи, в которую в конце 1940-х — в начале 1950-х годов осуществлялся систематический сброс жидких радиоактивных отходов с ПО «Маяк». Эта группа лиц получила максимальные дозы в когорте (средняя доза в этой группе составила 264 мГр, максимальная — 1130 мГр).

Общая численность анализируемой когорты составила 21384 человека, при исключении лиц, получивших дополнительное облучение в прибрежных селах реки Течи — 19329 человек.

При анализе риска развития ЗО использовались индивидуализированные дозы, рассчитанные по обновленной дозиметрической системе TRDS-2016. Реперной была выбрана доза на желудок. Средняя доза для всех членов КВУРС составила 36 мГр, максимальная — 1130 мГр, при исключении лиц, дополнительно облучившихся на реке Тече, средняя доза составила 11 мГр, максимальная — 121 мГр. Около 91% членов когорты получили дозы на желудок до 100 мГр.

Был проведен многофакторный анализ зависимости показателей заболеваемости и смертности от радиационных и нерадиационных факторов с использованием статистического пакета Эпикур как во всей КВУРС, так и в когорте с исключением облученных на реке Тече. Анализировалось 1609 случаев заболеваний и 1294 случая смерти от ЗО (1366 и 1111 случаев соответственно в субкогорте).

В результате анализа риска ЗО за 57-летний период наблюдения во всей КВУРС был получен статистически значимый избыточный относительный риск (ИОР) заболеваний равный 0,05 на 100 мГр (95 % ДИ: 0,01-0,1; $p = 0,02$), а ИОР смерти — 0,05 на 100 мГр (95 %

ДИ: 0,002-0,11, $p = 0,04$). При исключении лиц, получивших облучение на реке Тече, ИОР оставался положительным, но статистически незначимым ($p = 0,15$ — для заболеваемости и $p = 0,23$ — для смерти от ЗНО).

Проведенный анализ показал, что значимость величины радиационно-связанного риска развития ЗО в КВУРС обеспечивается за счет высокодозовой группы лиц, получивших дополнительное облучение на реке Тече.

Тестирование вида дозовой зависимости показало, что эффект от дозы наилучшим образом описывается линейной моделью. Не было выявлено статистически значимой модификации ИОР нерадиационными факторами, такими как пол, национальность, достигнутый возраст, факт эвакуации как во всей КВУРС, так и в субкогорте с исключением лиц, облученных на реке Тече.

Полученные результаты величин риска хорошо соотносятся с результатами исследований в японской когорте лиц, переживших атомную бомбардировку в Хиросиме и Нагасаки, в когорте работников атомных предприятий INWORKS, в когорте ликвидаторов аварии на ЧАЭС.

Заболеваемость раком молочной железы среди женщин, облученных на Южном Урале в детском возрасте

Л.Ю. Крестинина

ФГБУН «Уральский научно-практический центр радиационной медицины» ФМБА России,
Челябинск
ludmila@urcrm.ru

Объектом исследования являются женщины, аварийно-облученные в возрасте до 20 лет в пятидесятых годах прошлого столетия в результате проживания в прибрежных пунктах реки Теча и на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС).

Целью настоящей работы является оценка риска заболеваемости раком молочной железы среди женщин Уральской когорты, облученных в детском возрасте (УКОД) за период с 1956 по 2018 годы.

В УКОД включены лица, постнатально облученные в возрасте от 0 до 20 лет в период с 1.1.1950 г. по 31.12.1960 г. на территории Челябинской или Курганской области в результате двух радиационных аварий (сброса радиоактивных отходов в реку Теча и образования ВУРС). Общая численность УКОД составила около 33 тысяч человек. Доступность информации о случаях ЗНО только с 1.1.1956 г. привела к ограничению численности когорты (после исключения всех выбывших до 1956 г. — по причине смерти, ЗНО, или потери) до 31577 человек, в которой численность женщин составила 15853 человека. По этнической принадлежности 33% женщин составляют татары и башкиры и остальные 67% являются русскими.

По возрасту на момент облучения 66 % были младше 10 лет (33 % — до 1 года, 17 % — от 1 до 5 лет, 16 % — с 5 до 10 лет), и около 34 % были в возрасте от 10 по 19 лет включительно.

Территория наблюдения за онкологической заболеваемостью (ТНЗ) была ограничена 5 районами Челябинской области, г. Озерском и г. Челябинском. Из 15853 женщин около 23 % не проживали на ТНЗ с 1.1.1956 по 31.12.2018 г. и поэтому не участвовали в анализе (основная часть этих лиц проживала в Курганской области, которая входит только в территорию наблюдения за смертностью). К концу 2018 года на ТНЗ остались живыми — 4789 женщин, 2847 — умерли, 1334 имеют неизвестный статус и 3164 человека мигрировали с ТНЗ. За период с 1956 по 2018 гг. на ТНЗ было зарегистрировано 199 случаев рака молочной железы (РМЖ). За 63-летний период информация о морфологическом подтверждении диагноза имеется для 184 (92,5 %) случаев, для 6 (3 %) случаев — инструментальное подтверждение, для 5 (2,5 %) — клиническое подтверждение и для 4 (2 %) — только свидетельство о смерти.

Доза на молочную железу, накопленная за весь период наблюдения, для каждой женщины, включая компоненту внешнего и внутреннего облучения с учетом возрастных изменений, была рассчитана сотрудниками биофизической лаборатории УНПЦ РМ с использованием усовершенствованной дозиметрической системы TRDS-2016. Средняя доза на молочную железу для членов аналитической когорты (проживавших на ТНЗ какой-либо период) за весь период наблюдения с 5-летним минимальным латентным периодом составила 42 мГр, максимальная — 1 Гр. Дозу свыше 100 мГр получили всего 7% членов когорты.

Для анализа риска заболеваемости РМЖ применен метод регрессионного анализа с использованием простой параметрической модели избыточного относительного риска (ИОР) и статистического пакета Эпикур.

Было получено статистически значимое увеличение базовых (независимых от дозы) уровней заболеваемости РМЖ с увеличением достигнутого возраста, уменьшением числа родов (нерожавшие или 1 роды), увеличением календарного периода (после 1986 г.), у имевших родственников первой линии с РМЖ или раком простаты. Данные показатели были включены в модель расчета базовых уровней.

Анализ дозовой зависимости с включением в базовые уровни коррекции по указанным выше параметрам, выявил достоверно увеличенный риск заболеваемости РМЖ у отдельных групп женщин, а именно: у облученных в возрасте до 10 лет (ИОР/Гр = 2,6 (95 % ДИ: 0,19-6,35); у женщин, которые имеют родственников первой линии родства с РМЖ и раком простаты ИОР/Гр = 11,55 (95 % ДИ: 0,86-55,12), а также у нерожавших или имеющих 1 роды ИОР/Гр = 3,84 (95 % ДИ: 0,48-9,55). Во всей субкогорте женщин, облученных в возрасте до 20 лет, величина ИОР была положительная, но статистически не значимая (1,23/Гр; 95 % ДИ: -0,25; 3,54).

Зависимость базовых уровней РМЖ от числа родов и наличия РМЖ у родственников описана во многих исследованиях. В нашем исследовании показано, что у лиц, имеющих наследственную предрасположенность к РМЖ, воздействие дозы вносит дополнительное увеличение уровней РМЖ. Риск развития РМЖ также увеличивается у нерожавших женщин или имевших только 1 роды относительно рожавших 2 и более раза. Статистически значимый ИОР РМЖ в зависимости от дозы у женщин, облученных в возрасте до 10 лет не противоречит данным, полученным в японской когорте LSS и в Уральской когорте аварийно-облученного населения.

Гармонизация результатов многолетнего мониторинга содержания ^{90}Sr в организме человека

Е.А. Шишкина, М.О. Дегтева

ФГБУН «Уральский научно-практический центр радиационной медицины» ФМБА России,
Челябинск
lana@urcrm.ru

Гармонизация данных — это сведение в единую систему, унификация и упорядочение неравноточных результатов измерений разного качества для обеспечения возможности их совместного анализа. Настоящее исследование посвящено гармонизации результатов измерения содержания ^{90}Sr в организме населения, проживавшего на радиоактивно загрязненных территориях Уральского региона. В базе данных УНПЦ РМ имеется информация о > 32000 измерений содержания ^{90}Sr в зубах, проводившихся с 1958 по 1997 годы с помощью зубных датчиков (ЗД) (торцевой счетчик Гейгера-Мюллера). В этот период использовались 3 разных прибора с неописанными метрологическими характеристиками. Кроме того, имеются >40000 измерений ^{90}Sr во всем теле, проводимых начиная с 1974 года с помощью спектрометра излучений человека (СИЧ). Аналоги метрологических характеристик СИЧ были оценены ретроспективно ранее. У многих людей имелись повторные измерения, выполнявшиеся в разные годы как одним и тем же методом, так и разными методами. Оба типа измерений используются для индивидуализации референтных поступлений радионуклида с рационом, а именно для оценки коэффициента перехода: а) к среднему по населенному пункту поступлению; б) к среднему по хозяйству поступлению; в) к индивидуальному поступлению. Таким образом, для решения одной задачи используются измерения, выполненные разными методами с разной точностью.

Для гармонизации данных были сделаны следующие шаги:

1. Оценены значения, присваиваемые измерениям СИЧ ниже уровней надежного детектирования (аналога предела детектирования) и их неопределенностей;
2. Разработан алгоритм взвешенного усреднения коэффициентов индивидуализаций, полученных на основе повторных измерений человека на СИЧ, и оценки неопределенности средневзвешенных;
3. Оценка так называемого порога устойчивого детектирования ЗД, выше которого относительная стандартная неопределенность (δ) однократного измерения постоянна и $\leq 25\%$;
4. Оценка нижнего предела индивидуализации — минимального значения ЗД, приемлемого для индивидуализации при наличии повторных измерений в разные годы, так, чтобы $\delta \leq 25\%$.
5. Оценка сходимости коэффициентов индивидуализации, полученных на основе измерений СИЧ и ЗД.

Оценки присваиваемых значений (их неопределенностей) для измерений СИЧ ниже уровней надежного детектирования зависят от количества индивидуальных измерений и их величины относительно базового предела детектирования (аналога минимально детектируемой активности). Если результат измерения ниже базового предела детектирования, то присваиваемые величины, в зависимости от наличия повторных измерений и их величин, находятся в диапазоне 0,29-0,42 кБк; δ приписываемых активностей > 2,5 и для единичных измерений $\delta = 4,3$. Если результат выше базового уровня, но не превышает уровня надежного детектирования, то приписываемые значения находятся в интервале 1,3-1,5 кБк с δ от 0,83 до 1,3.

Взвешенное усреднение проводилось с учетом того, что вероятность смещенности результата определяется двумя факторами: 1) случайная вариабельность, определяемая величиной, обратной дисперсии $1/\sigma^2$; и 2) надежностью оценки — экспертно

устанавливаемый уровень доверия как пропорциональный квадрату взвешиваемой величины (\widehat{M}^2). Иначе говоря, $\omega_i = 1/\delta_i^2$. А относительная погрешность средневзвешенного коэффициента индивидуализации \bar{K} , согласно закону распространения неопределенностей, — $\delta_{\bar{K}} = (\sqrt{\sum_{i=1}^n \omega_i})^{-1}$.

Порог устойчивого детектирования ЗД, использовавшегося: (1) в 1974-1997 гг. — 240 имп. мин⁻¹ ($\delta = 0,16$); (2) в 1967-1973 гг. — 500 имп. мин⁻¹ ($\delta = 0,17$); (3) в 1958-1966 гг. — 700 имп. мин⁻¹ ($\delta = 0,25$).

Нижний предел индивидуализации для ЗД, использовавшегося: (1) в 1974-1997 гг. — 26 имп. мин⁻¹; (2) в 1967-1973 гг. — 70 имп. мин⁻¹; (3) в 1958-1966 гг. — этот порог совпал с порогом устойчивого детектирования — 700 имп. мин⁻¹ ($\delta = 0,25$).

Сопоставление 374 коэффициентов индивидуализации, полученных на основе измерений СИЧ и ЗД, показало, что 89 % коэффициентов индивидуализации не противоречат друг другу (в пределах 90 % ДИ). Таким образом, в подавляющем большинстве параллельных оценок двумя методами наблюдается хорошая сходимость. Далее будет выбираться наилучшая оценка из двух возможных по величине наименьшей неопределенности.

Радиологическое воздействие на население за счет атмосферных выбросов модулей ОДЭК и ПЭК

В.М. Соломатин, В.К. Иванов, Е.В. Спирин, С.С. Авраменко

Акционерное общество «Прорыв», Москва
svm@proryv2020.ru

Основы государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации (РФ) определяют необходимость обеспечения ядерной и радиационной безопасности объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) с учетом современных требований. В частности, должны быть выполнены оценки безопасности и величины потенциального облучения при нормальной эксплуатации и в случае нештатных ситуаций. В Российской Федерации требования к допустимым уровням облучения и величинам для их оценки определены в действующих нормах радиационной безопасности (НРБ-99/2009) и основных санитарных правилах обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010).

Одним из основных способов обоснования радиационной безопасности населения и персонала на стадии проектирования ОИАЭ является моделирование сценариев режимов работы установки при нормальной эксплуатации и сценариев аварийных выбросов, а также их возможного радиологического воздействия. Для этого используются утвержденные методические указания и специализированные компьютерные коды, позволяющие проводить расчеты атмосферного переноса радиоактивных веществ, их осаждение на подстилающую поверхность по историческим данным метеорологических наблюдений и выполнять оценку доз облучения для референтных групп населения.

В соответствии с проектом «Прорыв» на территории Сибирского химического комбината (г. Северск Томской области) ведется строительство и планируется ввод в эксплуатацию опытно-демонстрационного энергокомплекса (ОДЭК) с реактором на быстрых нейтронах — БРЕСТ-ОД-300 и комплексом по замыканию топливного цикла, а также ведется разработка проектной документации промышленного энергокомплекса (ПЭК) с реакторной установкой БР-1200.

В результате изучения воздействия выбросов при эксплуатации модулей ОДЭК и ПЭК, на основе расчетов атмосферного переноса, были получены исходные для проведения оценок радиологических рисков, эквивалентные дозы на 23 органа и эффективная доза за счет метеорологического фактора. Эти данные учитывают динамику формирования дозы после поступления в организм, необходимую для учёта факторов неопределённости моделей радиационных рисков Международной комиссии по радиологической защите (Публикация 103 МКРЗ).

Проведенный анализ прогнозируемых доз облучения на предмет удовлетворения требованиям НРБ-99/2009 показал, что для проектных аварий установленные дозовые пределы превышены не будут. Выбросы при нормальной эксплуатации лежат в пределах установленных квот с запасом в несколько порядков величины. В то же время следует отметить, что в случае аварий основной вклад в ожидаемые дозы облучения связан с пероральным поступлением при потреблении продуктов местного производства.

Прогнозные оценки радиологических рисков населения, проживающего вблизи ОДЭК и ПЭК, обусловленных выбросами при нормальной эксплуатации, были выполнены с учётом факторов неопределённости моделей рисков, полученных на основе моделей радиационных рисков Международной комиссии по радиологической защите (Публикация 103 МКРЗ), для метрик пожизненного атрибутивного риска, по 5-летним половозрастным группам населения, проживающего вблизи ОДЭК и по следующим ЗНО: а) лейкозы, б) все солидные ЗНО в совокупности.

Полученные данные показали, что для всех рассмотренных сценариев атмосферных выбросов радиоактивных веществ при нормальной эксплуатации модулей ОДЭК и ПЭК, индивидуальные пожизненные риски населения, проживающего вблизи расположения объектов, намного меньше соответствующих предельных значений, установленных НРБ-99/2009 и ОСПОРБ-99/2010.

Величина «эффекта здорового работника» у персонала ядерной индустрии сравнима с показателями для пилотов, атлетов и военнослужащих

А.Н. Котеров*, Л.Н. Ушенкова, М.В. Калинина, А.П. Бирюков

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

* govorilga@inbox.ru

Проведен мета-анализ (программа WinPeri; version 11.60) исследований индексов «Стандартизованное отношение смертности» ('Standardized mortality ratio'; SMR, в % сравнительно с генеральной популяцией) по показателям общей смертности (SMR all causes) и смертности от всех злокачественных новообразований (SMR all cancer) для работников ядерной индустрии (nuclear workers; NW) 15 стран (по исходным данным из pooled-анализа Vrijheid M. et al., 2007; Россия не представлена).

Для NW обнаружен значительный «эффект здорового работника» ('Health worker effect'; HWE) по обоим показателям (SMR = 62 (95 % CI: 56; 69) и 74 (95 % CI: 69; 78) соответственно). Публикационное смещение по Egger's test не зарегистрировано ($p = 0,205-0,228$).

Выявленные величины SMR для NW сравнивали с данными для других профессиональных групп (результаты мета-анализов и отдельных работ с максимальными и минимальными величинами SMR). Получены следующие данные для SMR all causes и SMR all cancer соответственно (в скобках: 95 % Confidence intervals; CI):

Group or cohort	SMR, all causes (95 % CI), %	SMR, all cancer (95 % CI), %
Космонавты (Ushakov I.B. et al., 2017)]	40 (27; 61)	71 (32; 106)
Астронавты (Reynolds R.J., Day S.M., 2019)]	51 (38; 68)	51 (27; 87)
Атлеты, Польша (Gajewski A.K., Poznanska A., 2008)	50 (41; 56)	нет данных
Пилоты. Pooled-анализ 10 стран, Европа + США (Hammer G.P. et al., 2014)	56 (54; 58)	69 (64; 76)
Атлеты NBA. Баскетбол, США (Reynolds R.J., Day S.M., 2019)	60 (53; 68)	54 (42; 69)
Работники ядерной индустрии (NW); настоящий мета-анализ	62 (56; 69)	74 (69; 78)
Атлеты МВА. Баскетбол, США (Reynolds R.J., Day S.M., 2019)	67 (63; 70)	нет данных
Военнослужащие; мета-анализ 10 работ; США, Великобритания (McLaughlin R. et al., 2008)	76 (65; 89)	78 (63; 98)
Химическая индустрия; мета-анализ 181 работы (Greenberg R.S. et al., 2001)	90 (87; 92)	99 (94; 104)
Производство асбоцемента; pooled-анализ 21 работы (Luberto F. et al., 2019)	123 (119; 126)	147 (141; 153)

* Полужирным шрифтом выделены данные мета-анализов, выполненных в настоящем исследовании, а также показатели с наличием HWE (величина верхнего CI < 1,0).

Таким образом, NW характеризуются весьма высокими HWE, сравнимыми с показателями для американских атлетов (баскетбол). Этот вывод не может быть окончательным в количественном плане, поскольку выборка источников для NW была хотя и репрезентативной (вошли данных интернационального исследования 15 стран Vrijheid M. Et al., 2007), но не оказалась полной на текущий момент. Поэтому полученные данные представленного мета-анализа следует рассматривать как адекватные, но предварительные, на 2007 г. Следует иметь в виду, однако, что с течением десятилетий, начиная с конца

1940-х гг., показатель SMR all causes для работников ядерной индустрии уменьшается (Котеров А.Н. и др., 2020). Возможно — из-за увеличения времени занятости, которому показатель HWE обратно пропорционален (Monson R.R., 1986).

Тем не менее, полученные данные устраняют сложившиеся стереотипы и могут улучшать имидж занятости на предприятиях ядерной индустрии.

Оценка заболеваемости, смертности и летальности вследствие повторного инфаркта миокарда в когорте лиц, работающих на объектах использования ионизирующего излучения

А.Р. Тахауов¹, Д.Е. Калинин^{1,2}, Л.Р. Тахауова^{1,2}

¹ ФГБУН «Северский биофизический научный центр» ФМБА России, Северск, Томская область

² ФГБОУ ВО «Сибирский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Томск

Сердечно-сосудистые заболевания занимают лидирующее место в структуре причин смерти населения промышленно развитых стран. Следует отметить, что влияние техногенных факторов на развитие острого инфаркта миокарда (ОИМ) изучается довольно активно, в то же время обращает на себя внимание дефицит научных сведений об их влиянии на развитие повторного инфаркта миокарда (ПИМ). Ввиду широкого применения в современном мире ионизирующего излучения (ИИ) изучение его влияния на заболеваемость, смертность и летальность не только ОИМ, но и ПИМ становится актуальной задачей. Эпидемиологические исследования, выполняемые на основе когорт лиц, работающих на объектах использования ионизирующего излучения (ОИИИ) и подвергавшихся облучению в ходе своей профессиональной деятельности, являются основным источником для получения информации о влиянии ИИ на организм человека. Ранее проводимые исследования, выполненные на когортах лиц работников ОИИИ, не дали окончательного ответа о связи ИИ с развитием ОИМ. Исходя из этого, можно говорить, о том, что оценка вклада ИИ в патогенез ПИМ требует проведения дальнейших исследований.

Целью работы является оценка показателей заболеваемости, смертности и летальности вследствие ПИМ у лиц, подвергавшихся профессиональному облучению ИИ, на основании данных регионального медико-дозиметрического регистра и регистра ОИМ.

Изучаемая когорта включает работников ОИИИ, имеющих дозу внешнего, внутреннего или сочетанного облучения ИИ, а также работников, не подвергавшихся облучению ИИ. Общая численность когорты — 4203 человека, из них 2918 мужчин и 1285 женщин. Период наблюдения охватывает 1995-2017 гг. Информацию об остром коронарном синдроме у работников ОИИИ старше 20 лет собирали в соответствии с программой "Регистр ОИМ", рекомендованной ВОЗ в 1968 г. Диагноз ПИМ устанавливали по 2 категориям: "определённый" и "возможный" с использованием стандартных критериев (клиническая картина заболевания, изменения на электрокардиограмме, повышение активности или концентрации маркеров некроза миокарда в плазме крови), а в случаях смерти — данных морфологических изменений в миокарде и коронарных сосудах. Диагноз ПИМ (коды по МКБ-10 I 22.0-I 22.9) был верифицирован у 986 человек (657 мужчин и 329 женщин). Для всех членов когорты жизненный статус был уточнён. Так, окончанием срока наблюдения за работниками без ПИМ являлась дата окончания периода наблюдения (31.12.2017), для умерших — дата смерти, для лиц с ПИМ — дата установления диагноза заболевания, для уехавших с постоянного места жительства — дата последнего уточнения жизненного статуса.

При оценке показателей заболеваемости, смертности и летальности ПИМ в когорте работников ОИИИ общая заболеваемость ПИМ выросла с 28,8 до 37,0 на 100000 населения (доля мужчин и женщин сохранялась весь период одинаковой: 65 ± 5 и 35 ± 5 % соответственно). Смертность от ПИМ в изучаемой когорте выросла с 0,172 до 0,198 % (у мужчин с 0,164 до 0,222 %, у женщин с 0,077 до 0,101 %). Летальность также имела тенденцию к росту с 17,9 до 39,6 % (у мужчин с 19,6 до 36,7 %, у женщин с 12,8 до 41,0 %).

Анализ показателей заболеваемости, смертности и летальности персонала ОИИИ позволил зарегистрировать рост заболеваемости и смертности от ПИМ как у мужчин, так и у женщин старшей возрастной группы в условиях изолированного внешнего облучения ИИ. По результатам проведённого исследования можно говорить о повышении уровня

заболеваемости, смертности и летальности у работников ОИИИ, подвергающихся в ходе своей профессиональной деятельности облучению ИИ. У работников изучаемой когорты при наличии профессионального облучения ИИ установлена тенденция к увеличению заболеваемости ПИМ в период 1995-2017 гг.

Структурно-функциональные особенности и морфогенез радиационно-индуцированного рака легкого у лиц, подвергшихся профессиональному облучению

Г.В. Сычугов¹, Е.Л. Казачков¹, Т.В. Азизова², Г.В. Жунтова², Е.С. Григорьева²,
А.Г. Сычугов¹

¹ ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный медицинский университет» Министерства
здравоохранения Российской Федерации, Челябинск

² ФГБУН «Южно-Уральский институт биофизики» ФМБА России,
Озерск, Челябинская область
clinic@subi.su

Повышенный риск рака легкого (преимущественно аденокарциномы) обнаружен у работников, подвергавшихся внутреннему альфа-облучению в результате ингаляционного поступления аэрозолей плутония и хроническому внешнему гамма-облучению. Механизмы развития радиационно-индуцированного рака изучены недостаточно.

Целью исследования являлось сравнение образцов аденокарциномы легкого у работников плутониевого производства и лиц, не подвергавшихся профессиональному облучению.

Для проведения настоящего исследования были подобраны биологические образцы ткани легкого от доноров, соответствующих следующим критериям:

а) продолжительность работы на основных заводах ПО «Маяк» (реакторы, радиохимический завод, завод по производству плутония) более 10 лет;

б) наличие измеренных индивидуальным дозиметром годовых доз внешнего гамма-излучения в течение всего периода работы;

в) наличие измерений альфа-активности в биосубстратах, и рассчитанной годовой дозы внутреннего альфа-облучения;

г) причина смерти — рак легкого, подтвержденный патологоанатомическим исследованием;

д) известный гистологический тип рака легкого, подтвержденный иммуногистохимическим исследованием.

В контрольную группу были включены лица, никогда не подвергавшиеся профессиональному облучению.

Иммунохимическими методами исследованы коллагены I, IV, V типов, матриксные металлопротеиназы MMP-2 и MMP-9, тканевые ингибиторы матриксных металлопротеиназ TIMP-1 и TIMP-2, лейкемие-ингибирующий фактор (LIF), каспаза 3 (CPP32), онкопротеин BCL-2 антиген ядер пролиферирующих клеток Ki-67. Морфометрическим методом определяли объемную плотность фиброзных волокон. Для оценки различий между группами использовали U-критерий Манна-Уитни, зависимость изучаемых показателей от доз профессионального альфа- и гамма-облучения исследована на основе линейной многофакторной регрессионной модели. Коэффициенты регрессии были представлены как $\beta \pm SE$ (стандартная ошибка).

Между сравниваемыми группами обнаружены статистически значимые различия в составе компонентов экстрацеллюлярного матрикса (ЭЦМ) и экспрессии большинства исследованных маркеров процессов клеточного обновления, как в образцах аденокарциномы (АКЛ), так и в параканкрозной ткани (ПКТ). Статистически значимо зависели от дозы альфа-облучения следующие показатели: в АКЛ — Ki-67 ($-0,704 \pm 0,246$; $p = 0,006$) и collagen IV типа ($-0,359 \pm 0,149$; $p = 0,018$), (отрицательная связь); в ПКТ — LIF ($0,263 \pm 0,092$; $p = 0,007$), (положительная связь). Зависимость от дозы внешнего гамма-излучения установлена: в АКЛ — TIMP-2 ($-0,703 \pm -0,703$; $p = 0,007$) и CPP32 ($-1,450 \pm -1,450$; $p = 0,002$)

(отрицательная связь), MMP-2 ($0,169 \pm 0,169$; $p = 0,018$) и LIF ($1,548 \pm 1,548$; $p = 0,006$) (положительная связь); в ПКТ — MMP-2 ($0,241 \pm 0,241$; $p = 0,034$) (положительная связь). Обнаружена статистически значимая связь между выраженностью общего фиброза ($p = 0,008$), объемной плотностью коллагена V типа ($p = 0,027$), экспрессией MMP-2 ($p = 0,002$), MMP-9 ($p = 0,035$) и возрастом доноров.

В тканях АКЛ и ПКТ легочной ткани у работников плутониевого производства отмечается выраженное нарушение баланса между экспрессией матриксных металлопротеиназ и их ингибиторов. Относительно высокий уровень MMP в ткани АКЛ у лиц, подвергавшихся длительное время профессиональному внутреннему альфа-облучению, может способствовать разрушению белков ЭЦМ и базальных мембран и ремоделированию соединительной ткани легких. Кроме того, в результате деградации матрикса под действием MMP, образуются биологически активные соединения, которые влияют на дифференцировку и пролиферацию клеток. Таким образом, нельзя исключить влияние дисбаланса в системе матриксных металлопротеиназ на развитие неопластических процессов в легочной ткани.

Наше исследование может предоставить дополнительные данные, касающиеся экспрессии MMP в легочной ткани и их значимости в качестве потенциального гистологического биомаркера с диагностической и прогностической ценностью.

Обнаружены существенные различия в структуре ЭЦМ и состоянии компонентов системы клеточного обновления в ткани опухоли и параканкрозной зоне аденокарциномы легкого в присутствии внутреннего α -излучения от инкорпорированных радионуклидов и без него. Полученные данные могут свидетельствовать о различных механизмах развития морфогенеза рака легкого в зависимости от характера повреждающего фактора.

Риск катаракты в когорте работников ПО «Маяк»

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

ФГБУН «Южно-Уральский институт биофизики» ФМБА России,
Озерск, Челябинская область
clinic@subi.su

Цель работы: оценка риска развития различных типов катаракты и оперированной катаракты в зависимости от дозы пролонгированного внешнего облучения с учетом нейтронного облучения и нерадиационных факторов.

Материалы и методы. Изучаемая когорта включала всех работников ПО «Маяк», впервые нанятых на один из основных заводов (реакторы, радиохимический, плутониевый) в период с 1 января 1948 г. по 31 декабря 1982 г., независимо от пола, возраста, национальной принадлежности, профессии, продолжительности работы и других характеристик, — 22377 человек (25,4 % — женщины). Средний возраст работников на момент найма составил 24,9 лет (стандартное отклонение, $CO = 7,5$). В период работы на предприятии работники изучаемой когорты подвергались внешнему гамма-облучению. Средняя суммарная доза внешнего гамма-облучения составила 0,54 Гр ($CO = 0,76$) у мужчин и 0,44 Гр ($CO = 0,65$) у женщин.

В настоящем анализе учитывались все впервые установленные случаи старческой катаракты и случаи оперированной катаракты за весь период наблюдения, независимо от глаза. Каждый морфологический тип катаракты (ЗСК, кортикальная, ядерная) анализировался отдельно.

Период наблюдения за когортой начинался от даты найма на один из основных заводов и продолжался до первого из следующих событий: даты установления диагноза старческая катаракта (для оценки риска заболеваемости различными типами катаракты), даты операции по удалению катаракты (для оценки риска оперированной катаракты); даты смерти; 31 декабря 2008 г. для живых работников, проживающих в г. Озерске (резиденты); даты «последней медицинской информации» для работников-резидентов с неизвестным жизненным статусом и для тех работников, кто выехал из г. Озерска (мигранты).

В исследовании использованы поглощенные дозы внешнего гамма-излучения и нейтронного излучения дозиметрической системы работников «Маяка» – 2008 («ДСРМ–2008»).

Результаты. К концу периода наблюдения в изучаемой когорте работников было зарегистрировано 4159 случаев старческой катаракты. Результаты анализа зависимости доза-эффект на основе линейной модели показали повышенный риск заболеваемости всеми типами катаракты: кортикальной, задней субкапсулярной (ЗСК) и ядерной. Избыточный относительный риск на единицу дозы внешнего облучения (ИОР/Зв) составил 0,28 (95 % ДИ: 0,20 – 0,37) для всех типов катаракты, 0,63 (95 % ДИ 0,49, 0,76) для кортикальной катаракты, 0,91 (95 % ДИ 0,67, 1,20) для ЗСК и 0,47 (95 % ДИ 0,35, 0,60) для ядерной катаракты. Исключение поправки на дозу нейтронного облучения приводило к снижению ИОР/Зв внешнего гамма-облучения для всех типов катаракт (кортикальная — 0,56 (95 % ДИ 0,45, 0,70); ЗСК — 0,86 (95 % ДИ 0,64, 1,13); ядерная — 0,47 (95 % ДИ 0,35, 0,60)). Оценка риска заболеваемости катарактой и отдельными ее типами снижалась при включении дополнительных поправок на индекс массы тела и индекс курения, в то время как введение поправки на глаукому приводило к незначительному увеличению риска заболеваемости кортикальной и ядерной катарактами (но не ЗСК). Включение поправки на наличие сахарного диабета приводило к снижению ИОР/Зв внешнего облучения только для заболеваемости ЗСК.

Повышенный риск заболеваемости всеми типами катаракт был обнаружен как у мужчин, так и у женщин изучаемой когорты, но ИОР/Зв у женщин был существенно выше ($p < 0,001$) при сравнении с мужчинами, особенно для ЗСК.

За весь период наблюдения в изучаемой когорте у 701 работника с верифицированным диагнозом старческая катаракта была проведена лэнсэктомия (16,7 %), и зарегистрирована оперированная катаракта: 447 случаев у мужчин (63,8 %) и 254 случая у женщин (36,2 %).

Не обнаружено статистически значимой зависимости оперированной катаракты от суммарной дозы внешнего гамма-облучения, как с поправкой, так и без поправки на дозу нейтронного облучения; ИОР/Зв составил 0,09 (95 % ДИ -0,02, 0,22) и 0,09 (95 % ДИ: -0,015, 0,22). Лаггирование, введение дополнительных поправок на нерадиационные факторы (АГ, ИМТ, глаукома, миопия, индекс курения) не оказывали влияния на полученный результат: оценка риска незначительно изменялась, но оставалась статистически незначимой, с широкими доверительными интервалами. Также не обнаружено статистически значимой модификации риска оперированной катаракты в зависимости от пола работников, возраста найма на предприятие и достигнутого возраста ($p = 0,10$, $p = 0,48$, $p = 0,26$).

Выводы. Установлена статистически значимая линейная зависимость заболеваемости старческой катарактой и отдельными ее типами от суммарной дозы внешнего гамма-облучения с учетом поправок на нерадиационные факторы (пол, достигнутый возраст, период рождения) и дозу нейтронного облучения.

Не обнаружено статистически значимой зависимости оперированной катаракты от суммарной дозы внешнего гамма-облучения, как с поправкой, так и без поправки на дозу нейтронного облучения.

Преконцептивное облучение мужчин: заболеваемость солидными раками среди потомков первого поколения

Н.Р. Кабирова, П.В. Окатенко, М.Э. Сокольников

ФГБУН «Южно-Уральский институт биофизики» ФМБА России,
Озерск, Челябинская область
kabirova@subi.su

Оценка связи возникновения опухолевых заболеваний у потомков облученных людей с радиационным воздействием является важной и далеко не решенной проблемой радиационной эпидемиологии. Имеются опубликованные данные о повышении риска опухолевых заболеваний у потомков лиц, пострадавших в результате атомной бомбардировки, что вызывает мировой интерес к данной проблеме и подчеркивает ее важность и актуальность. Внимание к данной проблеме определяется, прежде всего, все более возрастающей ролью ядерных технологий в жизни человека.

ФГУП «ПО «Маяк» является первым в России предприятием атомной индустрии, работники которого в процессе профессиональной деятельности могли подвергаться хроническому внешнему гамма-облучению и внутреннему облучению от инкорпорированных радионуклидов. Целью настоящего исследования является анализ заболеваемости солидными раками среди потомков облученных отцов при профессиональной деятельности на ПО «Маяк».

Для эпидемиологического когортного исследования сформированы группы лиц 1949–2002 годов рождения, отцы которых имеют измеренные дозы профессионального радиационного воздействия на ПО «Маяк» к моменту зачатия ребенка, при этом матери не контактировали с источниками ионизирующего излучения. Средняя доза внешнего гамма-облучения, накопленная отцами к моменту зачатия ребенка, составила 29,25 сГр (0,01 – 632 сГр). Общая численность выделенной когорты для исследования 14435 человек, 51 % лица мужского пола, 49 % — женского. В группе сравнения — потомков необлученных родителей — 32547 человек, 51,4 % лица мужского пола и 48,6 % — женского.

Для анализа заболеваемости злокачественными новообразованиями рассматривали случаи рака у каждого человека до возникновения первой опухоли. За весь период наблюдения с 1949 г. по 2018 г. в изучаемой когорте диагностировано 370 случаев заболевания ЗНО, в том числе 161 случай (43,5 %) у лиц мужского пола и 209 случаев (56,5 %) — у женского. В группе сравнения выявлено 495 случаев ЗНО, среди лиц мужского пола — 219 случаев (44,2 %) и у лиц женского пола — 276 случаев (55,8 %). Анализ онкологической заболеваемости проведен для всей когорты и отдельно для мужчин и женщин.

Коэффициенты заболеваемости солидными раками среди потомков облученных отцов в зависимости от возраста в изучаемой когорте выше таковых в группе сравнения, как среди потомков мужского пола, так и женского (63,6 против 53,1; 84,9 против 68,3 сл. на 10^5 чел.-лет, соответственно), превышение статистически значимо, за счет достоверного превышения в возрастных группах 16-19 лет и 50-60 лет. Коэффициенты заболеваемости солидными раками среди потомков обеих групп увеличиваются с возрастом.

В нозологической структуре заболеваемости солидными раками среди потомков мужского пола изучаемой когорты и группы сравнения, первое место занимают заболевания ЗНО органов пищеварения, при этом в группе потомков облученных отцов преобладает рак желудка, а в группе сравнения — раки ободочной кишки. На втором ранговом месте в изучаемой когорте — заболеваемость раком мочеполовых органов, в основном за счет рака предстательной железы, затем следуют ЗНО других и неуточненных локализаций, обусловленные опухолями головного мозга. В группе сравнения ЗНО других и неуточненных локализаций занимают второе ранговое место, где определяющую роль также играют опухоли

головного мозга, затем следует класс ЗНО органов дыхания и грудной клетки, обусловленные раком легкого.

Структура заболеваемости солидными раками у потомков женского пола отличается от таковой среди лиц мужского пола. Первое ранговое место в изучаемой когорте и группе сравнения занимает класс ЗНО костей, соединительной ткани, кожи и молочной железы, за счет рака молочной железы. Второе ранговое место в изучаемой когорте зарегистрировано за классом ЗНО мочеполовых органов, в основном за счет рака яичников. На третьем месте опухоли органов пищеварения и брюшины, обусловленные раком ободочной кишки. В группе сравнения второе ранговое место определено за ЗНО органов пищеварения и брюшины, а на третьем месте — раки мочеполовых органов.

Стандартизованное отношение заболеваемости солидными раками среди потомков мужского пола показало достоверное превышение заболеваемости раками органов пищеварения и брюшины 1,69 (ДИ 1,23-2,26). Достоверное превышение коэффициента заболеваемости ЗНО наблюдается среди потомков как мужского, так и женского пола, отцы которых подвергались облучению в дозах, превышающих 100,0 мГр за 1 календарный год до зачатия.

Динамика заболеваемости раком щитовидной железы у жителей г. Озерска

И.А. Мартиненко, М.Э. Сокольников, Н.А. Кошурникова

ФГБУН «Южно-Уральский институт биофизики» ФМБА России,
Озерск, Челябинская область
martinenko@subi.su

Исследование заболеваемости раком щитовидной железы (РЩЖ) у населения, проживающего вблизи предприятий атомной промышленности и энергетики, не теряет актуальности, поскольку во всем мире возрастают темпы строительства ядерных предприятий, и задача обеспечения радиационной безопасности жителей близлежащих населенных пунктов требует своевременного решения.

Уникальным материалом для проведения эпидемиологических исследований медицинских последствий техногенного облучения у населения является «Детский регистр г. Озерска». Для анализа из Регистра была выбрана когорта из 92624 лиц, которые родились в г. Озерске или приехали в возрасте до 15 лет. Период наблюдения за когортой охватывает 1948-2013 гг. Число случаев заболевания раком щитовидной железы в исследуемой когорте составляет 86. Динамика заболеваемости РЩЖ сопоставлена по показателям относительного риска с динамикой активности ^{131}I , поступавшего в атмосферу с газо-аэрозольными выбросами из труб ПО «Маяк».

В результате исследования показано, что через 30 лет после начала облучения у лиц, которые проживали в детском возрасте в период максимальных выбросов, уровень заболеваемости РЩЖ был выше, чем у лиц, проживавших в период снижения активности выбросов ^{131}I и в период прекращения выбросов. Исключение составляет период 2004-2007 гг., где относительный риск заболевания РЩЖ был повышен за счет проведения скрининга.

Компьютерная томография как фактор канцерогенного риска среди населения города атомной промышленности

М.В. Осипов

ФГБУН «Южно-Уральский институт биофизики» ФМБА России,
Озерск, Челябинская область
osipov@subi.su

Воздействие ионизирующего излучения при проведении компьютерной томографии (КТ) является источником потенциального риска для здоровья пациентов, связанного с вероятностью развития радиационно-индуцированных канцерогенных эффектов. За последние десятилетия во всем мире наблюдается неуклонный рост использования данного метода рентгенодиагностики, что привело к значительному увеличению коллективной дозы облучения населения за счёт КТ. При этом, доза облучения пациента при проведении КТ значительно выше, по сравнению с обычными рентгенодиагностическими исследованиями, а суммарная доза при неоднократных КТ-исследованиях, полученная пациентом в течение года, сравнима с уровнями, установленными НРБ для населения и персонала групп А и Б.

В отличие от сценариев производственного радиационного воздействия, применение ионизирующего излучения в медицине является целенаправленным и сопряжено с пользой для пациента, выраженной в получении диагностической информации, в связи с чем доза облучения при проведении диагностических процедур (за исключением профилактических осмотров) не нормируется. Согласно линейной беспороговой концепции МКРЗ, увеличение дозы облучения предполагает пропорциональное увеличение частоты стохастических эффектов (злокачественных новообразований и наследственных нарушений). Отсутствие ограничений по дозе диагностических КТ-исследований приводит к росту дозы «полезного» облучения пациентов, что диктует необходимость оценки отдалённых канцерогенных эффектов с целью управления потенциальными рисками для здоровья пациентов.

Для реализации поставленной задачи в рамках Государственного контракта в Южно-Уральском институте биофизики проводится ретроспективное эпидемиологическое исследование, направленное на оценку риска отдалённых последствий радиационного воздействия при рентгенодиагностических процедурах. В результате выполнения научно-исследовательской работы был создан медико-дозиметрический регистр лиц, проживающих на территории Озёрского городского округа и подвергавшихся воздействию рентгеновского излучения при компьютерной томографии с момента появления доступности данного метода диагностики для жителей Челябинской области. База данных «Регистр КТ», на настоящий момент содержащая информацию о 26626 КТ-исследованиях жителей города атомной промышленности, включая данные о факторах риска радиационной и нерадиационной природы, зарегистрирована в Федеральном институте промышленной собственности ([свидетельство о гос. регистрации № 2020622807 от 24.12.2020 г.](#)).

За период с 1993 по 2018 гг. в Регистре была собрана информация характере и количестве выполненных КТ-исследований, заболеваемости и смертности от всех причин, а также факторах риска радиационной и нерадиационной природы. Количество пациентов, вошедших в базу данных Регистра, на настоящий момент составляет 16624 человека, соотношение женщин и мужчин 1,06. Средний возраст обследованных составил 54 года. Доля работников производственного объединения «Маяк» в Регистре составила 25 %. Доля злокачественных новообразований, диагностированных впервые после даты проведения КТ-исследования, на дату окончания наблюдения в наблюдаемой госпитальной когорте составила 5,4 %, что в среднем в 7 раз выше аналогичного показателя по России.

Анализ риска выполнялся при помощи многофакторной регрессии. Альтернативной гипотезой, которая тестировалась путём подгонки параметрической модели, являлось наличие связи между вероятностью установления диагноза злокачественного новообразования (ЗНО)

и количеством диагностических КТ-исследований, выполненных в течение жизни пациентов, с учётом влияния факторов риска радиационной и нерадиационной природы, а также времени нахождения под наблюдением.

Предварительные результаты проведённого исследования показали статистически значимое повышение шансов (ДИ 95 % 1,01–1,10) установления диагноза ЗНО у пациентов, неоднократно обследованных методом компьютерной томографии, с учётом совокупного влияния пола, возраста на момент облучения, наличия контакта с производственным облучением, и времени нахождения под наблюдением. Полученные результаты свидетельствуют о возможном наличии радиогенной составляющей канцерогенного риска.

Одним из основных ограничений интерпретации полученных результатов является влияние обратной причинно-следственной связи, характерное для всех исследований «госпитальных» когорт, состоящих из лиц с нарушениями здоровья, в результате которого полученный коэффициент радиогенного риска для злокачественных новообразований может быть завышен.

Перспективами дальнейшей работы является возможность расширения периода наблюдения за когортой, а также оценка индивидуальных поглощённых доз в органах и тканях пациентов, что позволит перейти к индивидуализированным оценкам радиационного риска, связанного с воздействием рентгеновского диагностического излучения при проведении КТ.

Врожденные пороки развития у потомков работников производственного объединения «Маяк»

С.Ф. Соснина, П.В. Окатенко, М.Э. Сокольников

ФГБУН «Южно-Уральский институт биофизики» ФМБА России,
Озерск, Челябинская область
sosnina@subi.su

Изучение последствий контакта с источниками ионизирующего излучения на производстве для здоровья последующих поколений важно для нормирования доз техногенного облучения людей репродуктивного возраста и для прогноза неблагоприятных последствий родительского облучения у потомков. ПО «Маяк» — первое в России предприятие атомной энергетики, функционирующее с 1948 г.

Цель работы: оценка риска врожденных пороков развития (ВПР) у потомков работников ПО «Маяк», подвергшихся пролонгированному профессиональному радиационному облучению.

Материал и методы. Ретроспективное эпидемиологическое исследование проведено среди населения закрытого административно-территориального образования (ЗАТО) Озерск, градообразующим предприятием которого является ПО «Маяк». В когорту ($n = 17774$) вошли резиденты ЗАТО, родившиеся в городе в 1949-1973 гг., из них 11539 человек являлись потомками работников ПО «Маяк» и 6235 детей неэкспонированных родителей. Сравнимые группы сопоставимы по годам рождения, полу, факту рождения в ЗАТО. Анализ ВПР среди мертворожденных и живорожденных потомков проведен согласно Классу XVII «Врожденные пороки развития, деформации и хромосомные аномалии» (коды Q00-Q99) международной статистической классификации болезней и проблем, связанных со здоровьем, десятого пересмотра. Общий период наблюдения за когортой достигал 72 года (1949-2020 гг.). Учтены ВПР, диагностированные не только при рождении, но и в течение всей жизни потомков. Сравнение частот проведено с использованием критерия χ^2 и точного критерия Фишера, различия считались достоверными при $p < 0,05$. Расчет относительного риска среди потомков экспонированных и неэкспонированных родителей проводился с 95 % доверительным интервалом.

Результаты. В целом, частота ВПР в группах не различалась: всего в основной группе зарегистрировано 807 ВПР у 731 потомка (63,4 на 10^3), в группе сравнения — 416 ВПР у 365 человек (58,5 на 10^3), $\chi^2 = 1,62$, $p > 0,05$. Частота мертворождений вследствие ВПР среди потомков работников ПО «Маяк» (20,7 на 10^3 мертворождений) была статистически незначимо ниже, чем в группе сравнения (73,2 на 10^3 , F-тест $p > 0,05$), но вывод основан на единичных случаях. Ведущими локализациями в обеих группах были ВПР костно-мышечной, пищеварительной и кровеносной систем. Статистически значимых различий частоты ВПР по типам не выявлено, за исключением хромосомных аномалий, которые чаще диагностировались в контроле: 1,04 на 10^3 в основной группе и 2,6 на 10^3 в группе сравнения, $\chi^2 = 5,99$, $p = 0,014$. Относительный риск ВПР среди потомков персонала ПО «Маяк» был статистически значимо выше в возрасте родителей 31-35 лет и в возрасте отцов 36 лет и старше. Риск ВПР был ниже среди экспонированных матерей 20 лет и младше для потомков мужского пола — 0,58 (0,37-0,88). Оценка риска ВПР с учетом календарных периодов показала, что в 1949-1953 гг. риск ВПР был значимо выше в основной группе для потомков женского пола 2,09 (1,02-4,3) и обоих полов 1,56 (1,0-2,43) за счет ВПР пищеварительной системы — 5,56 (1,26-24,4). Оценка риска ВПР по типам пороков показала отсутствие различий в группах по всем подклассам ВПР за исключением хромосомных аномалий, которые чаще диагностировались у потомков необлученных родителей — 0,41(0,19-0,86), риск ВПР костно-мышечной системы в основной группе был повышен, но близко к статистически значимому — 1,26 (0,99-1,62). Расчет риска ВПР по нозологиям показал, что среди потомков экспонированных родителей реже диагностировались ВПР сердечных камер и соединений (Q20) — 0,36 (0,15-0,88) и синдром Дауна (Q90) — 0,37 (0,17-0,8)

у обоих полов, риск всех остальных нозологий значимо не различался. Родители-работники ПО «Маяк» подверглись до зачатия пролонгированному производственному облучению в широком диапазоне доз внешнего гамма-облучения гонад: до 4075,6 мГр на яичники (медиана — 67 мГр), до 5653,1 мГр на семенники (медиана — 125 мГр). Статистически значимое увеличение риска ВПР было найдено для преконцептивного гамма-облучения семенников в дозовых категориях 0,1-20 мГр, 50,1-100 мГр, 100,1-500 мГр.

Выводы. В целом, полученные результаты не указывают на повышенный риск врожденных пороков развития у потомков родителей, подвергшихся пролонгированному радиационному воздействию на производстве. Однако выявленные различия в риске ВПР по календарным периодам, возрасту родителей при рождении детей и категориям доз производственного облучения родителей будут важны для последующего эпидемиологического мониторинга.

Структура смертности населения г. Озерска за период 1948-2014 гг.

Ю.В. Царева, И.И. Ткачева, П.В. Окатенко

ФГБУН «Южно-Уральский институт биофизики» ФМБА России,
Озерск, Челябинская область
tsareva@subi.ru

Смертность трудоспособного населения является наиболее актуальной демографической проблемой, указывающей на необходимость оценки демографических и социально-экономических потерь. При изучении смертности населения первоначально значение имеет анализ причин смерти. Статистика причин смерти позволяет оценить социальное значение наиболее тяжелых болезней и определить приоритетные направления борьбы за снижение смертности и увеличения продолжительности жизни.

Целью настоящего исследования является изучение основных показателей смертности населения г. Озерска — первого в России города, возникшего 70 лет назад в связи со строительством и пуском в эксплуатацию ядерного комплекса ПО «Маяк».

Информация о дате и причине смерти для населения города была, в основном, получена из свидетельств о смерти, зарегистрированных в городском ЗАГСе. Причины смерти были закодированы по правилам Международной классификации болезней 9 и 10 пересмотра (МКБ-9 и МКБ-10). При этом кодировали как основную причину смерти, так и все пункты, вынесенные в медицинское свидетельство о смерти.

Первое место в структуре смертности среди жителей г. Озерска занимают болезни системы кровообращения (46,5 %). На втором месте стоят злокачественные новообразования (19,9 %), затем следуют травмы и отравления (13,2 %). Существенную роль играют также болезни органов пищеварения (4,4 %), болезни органов дыхания (3,8 %), инфекционные и паразитарные болезни (2,6 %) и психические расстройства (2,3 %).

Структура смертности среди мужчин и женщин практически не отличается. Следует отметить лишь факт, что женщины чаще умирают от болезней кровообращения (54,5 %), чем мужчины (39,4 %). Среди мужчин достоверно преобладают внешние причины смерти (19,1 % против 6,5 % среди женщин), а также существенную роль играют психические заболевания (3,4 % у мужчин, 1,1 % у женщин).

3. Радиобиологические основы патогенеза и лечения последствий ионизирующих излучений

Влияние импульсного магнитного поля на репарацию радиационно-индуцированных повреждений ДНК

Е.В. Стяжкина^{1,2}, А.А. Перетыкин¹, Е.А. Пряхин¹

¹ ФГБУН «Уральский научно-практический центр радиационной медицины» ФМБА России, Челябинск

² ФГБОУ ВО Челябинский государственный университет, Челябинск
yelena-st@mail.ru

Многочисленные исследования указывают на влияние неионизирующих электромагнитных излучений (ЭМИ) и полей (ЭМП) на клетки и организм растений, животных и человека, однако механизмы действия, а также эффекты ЭМП в комбинации с другими физическими факторами остаются нераскрытыми.

Целью данного исследования является оценка репарационной активности ДНК лейкоцитов периферической крови человека при действии импульсного магнитного поля (ИМП) после повреждающего внешнего гамма-облучения *in vitro*.

Материалы и методы. Для эксперимента использовали лейкоциты периферической крови 5-ти взрослых здоровых доноров без хронических заболеваний и вредных привычек. Образец крови каждого донора делили на 4 пробирки согласно исследовательским группам:

1 – биологический контроль – клетки крови в пробирке не подвергали каким-либо воздействиям, оценивали состояния ДНК через 10, 30, 60, 120 минут после забора крови;

2 – гамма-контроль – клетки крови подвергали внешнему острому γ -облучению в дозе 3 Гр *in vitro*, оценивали состояния ДНК клеток через 5, 30, 60, 120 минут после воздействия;

3 – ИМП-контроль – клетки крови подвергали ИМП-облучению в течение 5, 30, 60, 120 минут *in vitro*, оценивали состояния ДНК клеток через соответствующее время воздействия;

4 – оценка репарации ДНК клеток при воздействии ИМП в течение 5, 30, 60, 120 минут после острого γ -облучения в дозе 3 Гр *in vitro*.

Внешнее γ -облучение клеток крови *in vitro* проводили на установке ИГУР-1М с мощностью дозы 78 сГр/мин.

Воздействие ИМП проводили в генераторе ИМП, который имеет следующие параметры: импульс треугольной формы с длительностью импульса по уровню 0,5, равным 0,1 мкс, длительностью фронта 0,05 мкс, длительностью спада 250 нс; частота повторения импульсов 1,7 МГц. Индукция магнитного поля генератора в месте расположения биологических объектов составляет 16 мТл в импульсе.

Состояние ДНК оценивали с помощью щелочного варианта метода ДНК комет. Для характеристики состояния ядерной ДНК использовали параметр «момент хвоста» кометы.

Результаты. Оценка репарации ДНК клеток при воздействии ИМП после острого γ -облучения в дозе 3 Гр показала, что при 5 минут воздействия ИМП среднее значение «момента хвоста» комет составило 146 ± 6 , что было статистически значимо выше, чем значение параметра в группе ИМП-контроля (37 ± 3), и группе биологического контроля (18 ± 1), но не отличалось от значения показателя в группе γ -контроля (142 ± 6).

При 30 минутах воздействия ИМП после γ -облучения значение «момента хвоста» повышалось до 201 ± 10 и было статистически значимо выше, чем во всех других

экспериментальных группах: ИМП-контроля — 20 ± 2 ; γ -контроля — 67 ± 4 ; в группе биологического контроля — 15 ± 1 .

При 60 минутах воздействия ИМП после γ -облучения в дозе 3 Гр значение «момента хвоста» составило 76 ± 5 , что было статистически значимо выше, чем значение параметра в группе ИМП-контроля (10 ± 1), и в группе биологического контроля (33 ± 2), и не отличалось от значения в группе γ -контроля (74 ± 4).

При 120 минутах воздействия ИМП после γ -облучения значение «момента хвоста» составило 34 ± 2 , что было статистически значимо ниже, чем в группе γ -контроля (99 ± 7), и статистически значимо выше, чем в группе ИМП-контроля (7 ± 1), но не отличалось от значения в группе биологического контроля (24 ± 2).

Выводы. Значительное увеличение уровня повреждения ядерной ДНК при 30 минутах действия ИМП после γ -облучения может свидетельствовать о синергическом повреждающем действии исследуемых факторов при использованных уровнях их влияния, либо о стимулирующем действии ИМП на процессы эксцизионной репарации.

Реакция клеток растений на комбинированное действие ИМП и ИИ

А.Е. Алдибекова

ФГБУН «Уральский научно-практический центр радиационной медицины» ФМБА России,
Челябинск
albinaaes@gmail.com

В настоящей работе изучались эффекты комбинированного действия импульсного магнитного поля (ИМП) с несущей частотой 18 МГц, частотой повторения импульсов — 28 кГц, индукцией магнитного поля в импульсе — 75 мТл в течение 60 с до и после гамма-излучения в дозе 3 Гр на клетках меристемы проростков семян лука *Allium sera* L.

Оценку реакции клеток меристемы корня лука на комбинированное действие факторов проводили путем сравнения результатов реального и ожидаемого эффектов. Ожидаемый аддитивный эффект (P_{Σ}) рассчитывали по формуле:

$$P_{\Sigma} = 1 - (1 - P_a) * (1 - P_b),$$

где, P_{Σ} — расчетное значение показателя при аддитивном взаимодействии факторов а и b (ожидаемый эффект); P_a и P_b — фактические значения анализируемых показателей при воздействии факторов а и b.

Комбинированное воздействие осуществляли путем воздействия на семена ИМП и гамма-излучения в дозе 3 Гр (установка ИГУР-1М с 4 источниками ^{137}Cs с мощностью дозы 0,7 Гр/мин в рабочем пространстве). Были сформированы следующие экспериментальные группы: воздействие ИМП за 5 ч до гамма-облучения, воздействие ИМП через 5 ч после гамма-облучения; воздействие одного ИМП; воздействие одного гамма-облучения; ложное воздействие.

В группе ложного воздействия частота клеток с хромосомными aberrациями (ХА) составила ($2,8 \pm 0,5$) %. Воздействие ИМП приводило к статистически значимому увеличению хромосомных aberrаций до ($6,6 \pm 1,1$) % ($\chi^2 = 10,8$; $p = 0,001$). Гамма-облучение в дозе 3 Гр приводило к статистически значимому увеличению ХА до ($32,7 \pm 1,3$) % ($\chi^2 = 172,7$; $p < 0,001$). При расчёте ожидаемого аддитивного эффекта комбинированного действия ИМП и гамма-облучения в дозе 3 Гр, частота клеток с aberrациями в анаелофазе составляла ($37,7 \pm 2,1$) %. При комбинированном воздействии ИМП до и после гамма-облучения зафиксировано статистически значимое снижение показателя, как при сравнении с эффектом одного гамма-излучения, так и при сравнении с ожидаемым эффектом комбинированного действия. Воздействие ИМП за 5 ч до гамма-облучения приводило к снижению частоты aberrантных клеток до ($19,6 \pm 1,8$) %. Применение ИМП через 5 ч после гамма-облучения проростков приводило к более выраженному снижению частоты ХА до ($20,1 \pm 2,0$) %.

В группе ложного воздействия частота клеток с микроядрами составляла ($0,05 \pm 0,02$) %. При гамма-облучении в дозе 3 Гр отмечалось статистически значимое увеличение частоты клеток с микроядрами до ($3,2 \pm 0,10$) % ($\chi^2 = 590,8$, $p < 0,001$). При воздействии ИМП на активно делящиеся клетки меристемы проростков лука в течение 60 с происходило статистически значимое увеличение частоты клеток с микроядрами до ($0,16 \pm 0,03$) % ($\chi^2 = 11,1$, $p < 0,001$). Ожидаемый эффект комбинированного действия ИМП и гамма-излучения был равен ($3,3 \pm 0,2$) %.

Применение ИМП за 5 ч до гамма-облучения не приводило к статистически значимому изменению частоты клеток с микроядрами по сравнению с ожидаемым эффектом и равнялась ($3,3 \pm 0,2$) %. При гамма-облучении в дозе 3,0 Гр и последующем воздействии на клетки меристемы ИМП, регистрировали снижение частоты клеток с микроядрами при сравнении с группой ожидаемого эффекта ($\chi^2 = 19,0$; $p < 0,001$).

Полученные результаты позволяют предположить, что ИМП является фактором, индуцирующим в клетках элиминацию aberrантных клеток и изменения, характерные для радиационно-индуцированного адаптивного ответа.

Состояние здоровья населения, проживающего на территориях в зоне влияния радиационного фактора

Е.Г. Метляев, Н.К. Шандала, А.М. Лягинская, А.В. Титов, В.В. Купцов

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва
metlyaev@mail.ru

Современное состояние и проблемы охраны здоровья населения, проживающего вблизи радиационно опасных объектов или на территориях, загрязненных радиоактивными веществами, невозможно оценить без понимания основополагающих принципов и положений системы радиационной безопасности.

Ключевым положением системы защиты человека от действия ионизирующего излучения является то, что основным эффектом малых доз радиации является риск возникновения онкологических и наследственных заболеваний, индукция которых подчиняется линейной беспороговой концепции.

Согласно данной концепции, защита населения от действия ионизирующего излучения ориентирована, в первую очередь, на защиту от радиационно-индуцированного рака (первое поколение) и от наследственных (генетических) эффектов (будущее поколение).

В отношении индукции радиационных нераковых заболеваний МКРЗ признает факт наличия повышенной заболеваемости в ряде облученных популяций и наличие связи отдельных заболеваний с облучением — болезней сердца, органов пищеварения и органов дыхания — респираторные заболевания.

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России ведет мониторинг заболеваемости населения отдельных территорий, к которым можно отнести: территории «ядерного наследия», территории «уранового наследия», территории мирных ядерных взрывов и территории действующих объектов высокотехнологичной ядерной индустрии.

Так, город Лермонтов, основанный в 1953 г. как рабочий посёлок для шахтёров уранового рудника можно отнести к «урановому наследию». Радиационная обстановка в г. Лермонтов характеризуется повышенным содержанием радона в воздухе города и в воздухе жилых помещений. Наиболее значимым медицинским последствием поступления радона в организм человека в настоящее время признаётся рак лёгкого. Радон и продукты его распада при поступлении в организм создают в лёгких существенно большие дозы, чем в других органах. Облучение лёгких вносит 95% вклада в эффективную дозу, однако имеющиеся публикации показывают, что достаточно значимые дозы создаются в желудке, в разных отделах кишечника, а также в почках, печени и костном мозге и других системных органах. Имеющиеся данные показывают, что проживание населения на территории «уранового наследия» связано с риском облучения в малых дозах от радона и продуктов его распада за счёт ингаляционного поступления его от приземного слоя атмосферы города и от радона в жилых помещениях.

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России проведена оценка заболеваемости населения г. Лермонтов. Материалом исследования явились данные, полученные из отчётных медицинских форм, МСЧ № 101 ФМБА России за 2008-2018 гг. В качестве показателей оценивали общую и онкологическую заболеваемость с впервые установленным диагнозом взрослого и детского населения. При анализе особое внимание уделяли частоте и структуре заболеваемости органов дыхания, как критическому органу в условиях ингаляционного поступления радона.

В сравнительных оценках использовали данные о заболеваемости населения г. Железноводск, расположенного также в зоне влияния «уранового наследия», и г. Пятигорск — вне зоны влияния «уранового наследия» — контрольная территория.

Исследования показали, что заболеваемость (с впервые установленным диагнозом) населения г. Лермонтов, расположенного на территории «уранового наследия», оценивается

как высокая, превышающая заболеваемость городов сравнения г. Железноводск и г. Пятигорск и средние значения по Ставропольскому краю. По данным исследования в 2009-2018 гг. заболеваемость составляла $748,2 \pm 37,1$ на 1000 человек взрослого населения при $225,8 \pm 14,9$ и $456,5 \pm 38,7$ на 1000 человек соответственно, и $2233,6 \pm 94,6$ на 1000 человек при $647,3 \pm 14,8$ и $972,1 \pm 42,3$ на 1000 человек соответственно детского населения.

В структуре заболеваемости взрослого и детского населения г. Лермонтов выше заболеваемость в 13 классах болезней из 16, регистрируемых по МКБ-10, что свидетельствует о полисистемной реакции организма на воздействие неблагоприятных факторов внешней среды.

Максимальное повышение заболеваемости взрослого и детского населения характерны для 6 классов болезней: глаза, органов пищеварения, органов дыхания, костно-мышечной системы, кожи и подкожной клетчатки, мочеполовой системы, — то есть органов ингаляционного поступления, транзита и выделения из организма радона и продуктов его распада.

Онкологическая заболеваемость взрослого и детского населения г. Лермонтов соответствовала заболеваемости городов сравнения и не превышала средние популяционные оценки по РФ в целом: $3,9 \pm 0,3$ на 1000 человек при $4,03 \pm 0,4$ и $4,47 \pm 0,2$ на 1000 человек, соответственно, для взрослого населения и $0,09 \pm 0,16$ на 1000 человек при $0,12 \pm 0,12$ и $0,09 \pm 0,05$ на 1000 человек, соответственно, для детского населения.

Совокупность полученных результатов оценки состояния заболеваемости населения г. Лермонтов, расположенного на территории «уранового наследия», позволяет рассматривать радиационный фон радона в качестве одного из негативных факторов, влияющих на здоровье населения.

В дальнейшем предстоит создать базу данных заболеваемости населения отдельных территорий, дать радиобиологическую оценку заболеваемости и усовершенствовать систему мониторинга здоровья на данных территориях.

**Исследование влияния трансплантации
мезенхимальных стволовых клеток жировой ткани
в сочетании с хирургическим иссечением лучевых язв
при терапии тяжелых радиационных поражений кожи
в эксперименте**

В.Г. Лебедев, Ю.Б. Дешевой, Т.А. Насонова, О.А. Добрынина, Т.А. Астрелина

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва
vgleb468@yandex.ru

При использовании ионизирующих излучений для лечения опухолей могут возникать местные лучевые поражения, которые характеризуются развитием длительно незаживающих язв кожи на фоне нарушения трофики облученной ткани. Лечение хронических радиационных язв с применением обычных консервативных методов является очень сложной задачей. В таких ситуациях часто необходимо хирургическое вмешательство. Перспективным способом лечения местных лучевых поражений является применение клеточной терапии с использованием мультипотентных мезенхимальных стволовых клеток (ММСК), выделенных из жировой ткани. Стволовые клетки жировой ткани могут применяться как в виде культивированных ММСК, так и в виде стромально-васкулярной фракции (СВФ).

Целью исследования явилось изучение влияния трансплантации культивированных ММСК и клеток стромально-васкулярной фракции жировой ткани в сочетании с хирургическим иссечением радиационных язв на течение тяжелых местных радиационных поражений.

Крыс инбредной линии Wistar-Kyoto подвергали локальному воздействию рентгеновского излучения в подвздошно-поясничной области спины на установке ЛНК-268 (РАП 100 – 10) в дозе 110 Гр при мощности дозы 20,0 Гр/мин, напряжении 30 кВ, силе тока 6,1 мА, фильтр 0,1 мм Al, площадь поля облучения на поверхности кожи составляла 8,5 см². Жировую ткань для получения СВФ брали от интактных крыс, которые не использовались в дальнейшем. Выделение СВФ проводили путем ферментативной обработки размельченной жировой ткани в 0,015 % растворе коллагеназы IA для растворения коллагеновых волокон и освобождения клеток. Клетки СВФ жировой ткани трансплантировали двукратно в дозах 2,1 x 10⁶ и 2,5 x 10⁶ на 28-е и 35-е сутки после облучения соответственно. Культивированные ММСК трансплантировали двукратно в дозах 1,1 x 10⁶ и 1,0 x 10⁶ на 27-е и 34-е сутки после облучения соответственно. Хирургическое иссечение язв проводили на 22–23-е сутки после облучения, отступив 5–7 мм от внешней границы лучевой язвы. После облучения проводили наблюдение за процессом развития местного лучевого поражения и оценивали эффективность терапии. Анализировали динамику изменения площади радиационных язв и степени тяжести поражения у животных опытных групп по сравнению с облученным контролем. Площадь язв определяли с помощью планиметрии, которую проводили еженедельно, начиная с 14-х суток после облучения, в течение 4 месяцев. Тяжесть течения лучевого поражения кожи оценивали в динамике по клиническим проявлениям, с использованием бальной шкалы оценок.

Установлено, что у всех животных к концу 3-й недели после облучения образовывались язвы, покрытые плотным струпом. Площадь лучевых язв у крыс контрольной группы в период с 21-х до 112-х суток медленно уменьшалась от 4,6 ± 0,5 см² до 0,47 ± 0,10 см². Иссечение лучевых язв приводило к ускорению заживления раневого дефекта. К 70-м суткам после облучения у 37,5 % животных опытной группы с иссечением язвы заживали с образованием атрофического рубца, а к 112-м суткам число животных с атрофическими рубцами достигало 87,5 %. В контрольной группе к 112-м суткам после облучения полного заживления язв не было отмечено.

Изолированная трансплантация культивированных ММСК способствовала ускорению заживления лучевых язв, хотя в меньшей степени, чем в группе крыс с одним иссечением. Так, в группе с введением ММСК наблюдалось снижение клинических проявлений тяжести

течения лучевого поражения. В условиях комбинированного применения трансплантации ММСК и иссечения было отмечено положительное влияние на скорость восстановления как по показателям уменьшения площади язв, так и по уменьшению степени тяжести лучевого поражения.

Трансплантация клеток СВФ также способствовала ускорению заживления лучевых язв. Статистически значимое уменьшение площади язв при введении СВФ по сравнению с контрольной группой отмечалось, начиная с 75-х суток после облучения ($p < 0,05$). Наблюдалось также снижение степени тяжести клинических проявлений лучевого поражения. В условиях комбинированного применения иссечения и трансплантации клеток СВФ опытная группа крыс статистически значимо отличалась от группы с одним иссечением ($p < 0,05$) по клиническим показателям тяжести течения поражения.

Таким образом, полученные результаты показывают, что хирургическое иссечение лучевых язв в сочетании с клеточной терапией может оказаться эффективным способом лечения тяжелых местных лучевых поражений.

Количественная оценка пула регуляторных Т-лимфоцитов в отдаленные сроки после хронического облучения человека

А.И. Котикова^{1,2}, Е.А. Блинова^{1,2}, А.В. Аклеев^{1,2}

¹ ФГБУН «Уральский научно-практический центр радиационной медицины» ФМБА России, Челябинск

² ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет», Челябинск
kotikova@urcrm.ru

Интерес к регуляторным Т-клеткам и их роли в иммунных реакциях организма в условиях облучения растет с каждым годом. По литературным данным, около 5-10 % CD3⁺CD4⁺-клеток относятся к классу регуляторных Т-клеток [Beissert et al, 2006; Wan et al, 2023]. Т-регуляторные клетки развиваются из наивных Т-клеток, в результате контакта с антигенами и в присутствии таких факторов, как TGF-β и IL-2 [Kanamori et al, 2018] и являются важными участниками воспалительных и аутоиммунных процессов [Shevach, 2010], а с недавнего времени и противоопухолевой защиты [Persa et al, 2015].

В современном мире нет единого мнения о влиянии ионизирующего излучения на популяцию регуляторных Т-клеток: одни исследователи сообщают о большей радиорезистентности данного пула к воздействию радиации [Qu et al, 2010; Baba et al, 2012], другие говорят о снижении функциональной активности регуляторных Т-лимфоцитов [Billiard et al, 2010]. Поэтому целью настоящей работы был анализ содержания пула регуляторных Т-клеток в периферической крови облученных лиц в отдаленном периоде.

Материалы и методы. В исследовании приняло участие 35 человек, которые были разделены на две группы: облученные лица — 20 человек, и группа сравнения — 15 человек. Группа облученных лиц имела среднюю накопленную дозу облучения красного костного мозга (ККМ) $633 \pm 11,3$ мГр (от 116 до 2037 мГр), среднюю дозу облучения тимуса и периферических лимфоидных органов $94,2 \pm 1,91$ мГр (от 7,20 до 381 мГр), возраст группы составил $74,47 \pm 0,98$ лет (от 69 до 83 лет), в группе преобладали женщины (65 % против 35 % мужчин), представителей тюркской группы и славян было поровну.

Группа сравнения состояла из лиц, чьи накопленные за весь период жизни дозы облучения не превышали 70 мГр [СанПин 2.6.1.2523-09 «НРБ-99/2009», 2009]. Так, средняя накопленная доза облучения ККМ в группе составила $21,2 \pm 3,98$ мГр (от 0,78 до 52,6 мГр), а средняя накопленная доза облучения тимуса и периферических лимфоидных органов — $9,80 \pm 2,42$ мГр (от 0,45 до 26,4 мГр). Средний возраст группы составил $68,67 \pm 0,77$ лет (от 65 до 77 лет), в группе было чуть больше мужчин (53 %), чем женщин (47 %), представители тюркской языковой группы (87 %) преобладали над славянами (13 %).

Анализ количества Т-регуляторных лимфоцитов проводился методом проточной цитометрии на проточном цитометре Navios (Beckman Coulter, США) с использованием следующих моноклональных антител: CD3-FITC, CD4-APC, CD25-PE, CD127-PC7 (все производства Beckman Coulter, США), лизис эритроцитов производился с помощью лизирующего буфера VersaLyse (Beckman Coulter, США). Т-регуляторные лимфоциты описывались фенотипом CD3⁺CD4⁺CD25^{high}CD127^{low} [Селькова и др., 2012].

Результаты. В результате исследования были установлены медианные значения и 25-75 процентиля содержания Т-хелперов и Т-регуляторных лимфоцитов в периферической крови исследуемых лиц, данные представлены в таблице 1.

Таблица 1. Количество Т-хелперов и Т-регуляторных лимфоцитов в периферической крови исследуемых лиц.

Группа исследования	Т-хелперы, 10 ⁹ /л	Т-хелперы, %	Т-регуляторные, 10 ⁹ /л	Т-регуляторные, %
Облученные лица	1,06 (0,64-1,47) p* = 0,62	39,89 (34,18-45,81) P = 0,48	0,06 (0,04-0,08) P = 0,51	6,72 (4,78-7,45) P = 0,66
Группа сравнения	1,03 (0,72-1,09)	40,15 (36,70-45,81)	0,07 (0,05-0,07)	6,79 (4,63-8,46)

Примечание: *p — уровень значимости различий показателей между исследуемыми группами.

При сравнении показателей абсолютного и относительного числа Т-хелперов и регуляторных Т-клеток в периферической крови облученных лиц и группы сравнения не было обнаружено статистически значимых различий (таблица 1).

Корреляционный анализ зависимости Т-хелперов и Т-регуляторных лимфоцитов от накопленной дозы облучения ККМ и накопленной дозы облучения тимуса и периферических лимфоидных органов не выявил достоверных ассоциаций. Точно также не было обнаружено статистически значимых зависимостей показателей от возраста исследуемых лиц.

Выводы. Не обнаружено достоверных различий показателей регуляторных Т-клеток между группой облученных лиц и группой сравнения. Не выявлено достоверной корреляционной зависимости количества регуляторных Т-клеток в периферической крови облученных лиц от факторов радиационной и нерадиационной природы. Однако требуется увеличение выборки для выдвижения однозначных выводов.

Ретроспективная биодозиметрия инкорпорированных радионуклидов с использованием метода FISH

Е.И. Толстых, А.В. Возилова

ФГБУН «Уральский научно-практический центр радиационной медицины» ФМБА России,
Челябинск

evgenia.tolstykh@yandex.ru

Циркулирующие лимфоциты используются как «естественные биодозиметры». Это свойство лимфоцитов связано с тем, что частота хромосомных aberrаций, возникающих в них после облучения, пропорциональна накопленной дозе. Более того сформированные в лимфоцитах стабильные хромосомные aberrации (транслокации) обнаруживаются спустя годы и десятилетия после облучения с использованием метода FISH. Для цитогенетических исследований используют, как правило, Т-лимфоциты. Оцененную на основе хромосомных транслокаций дозу обычно интерпретируют, как дозу на красный костный мозг (ККМ). При внешнем равномерном гамма-облучении это вполне правомерно, поскольку доза на ККМ (местонахождение Т-предшественников), и прочие лимфоидные органы (место циркуляции Т-лимфоцитов), в этом случае практически совпадает. Однако в случае неравномерного облучения от инкорпорированных радионуклидов, когда доза на ККМ и другие лимфоидные ткани существенно различается, подобная интерпретация может приводить как к занижению дозы на ККМ, так и к ее завышению. Это связано с длительным существованием зрелых лимфоцитов во внескелетных лимфоидных органах и тканях, со способностью к делению Т-лимфоцитов в периферических лимфоидных органах, с длительным поддержанием определенного репертуара клонов Т-лимфоцитов в периферической крови.

Применение цитогенетических методов для биодозиметрии базируется на использовании калибровочных кривых, связывающих известную дозу облучения лимфоцитов и частоту транслокаций. В цели настоящего исследования не входит анализ этих калибровочных кривых и соответствующих коэффициентов перехода от частоты транслокаций к дозе на лимфоциты. **Наша задача** на основе модельного подхода определить, насколько средневзвешенная доза на Т-лимфоциты в пробе крови донора отличается от дозы на другие органы и ткани при различных сценариях радиационного воздействия, включая внутренне облучение от инкорпорированных радионуклидов.

Нами была разработана модель для оценки средневзвешенной дозы, накопленной геномом Т-лимфоцитов периферической крови донора к моменту отбора пробы. Модель позволяет определить: (1) долю Т-лимфоцитов, которые были сформированы до начала облучения (их прогениторы не облучались в ККМ, а сами лимфоциты и их потомки облучались в лимфоидных органах при циркуляции); (2) долю Т-лимфоцитов, сформированных после облучения (их прогениторы облучались в ККМ, и сами лимфоциты и их потомки облучались в лимфоидных органах). В модели учитываются доли времени, которое циркулирующие Т-лимфоциты проводят в различных лимфоидных органах. Была учтена возрастная динамика инволюции тимуса, которая приводит к снижению с возрастом выхода новых Т-лимфоцитов. Предполагается, что дозы на конкретные лимфоидные органы и ткани (но не Т-лимфоциты) рассчитываются по существующим биокинетическим и дозиметрическим моделям.

Модель предсказывает близкие значения дозы на Т-лимфоциты и ККМ в случае внешнего равномерного гамма-облучения, а также при внутреннем облучении не остеотропными радионуклидами (например, ^{144}Ce). В случае воздействия ^{90}Sr модель предсказывает, что дозы на Т-лимфоциты (определяющие частоту транслокаций) могут существенно (в разы) отличаться от доз на ККМ, что наиболее выражено для взрослых на момент поступления радионуклида. Таким образом, разработанная нами модель позволяет определить поправки к дозе, определенной цитогенетическими методами, чтобы получить дозу на отдельные органы и ткани при известных сценариях облучения.

Разработанный модельный подход был также использован для определения дозовых коэффициентов, позволяющих перейти от перорального поступления $^{89,90}\text{Sr}$, $^{141,144}\text{Ce}$, ^{95}Zr , ^{95}Nb и $^{103,106}\text{Ru}$ к дозе на циркулирующие Т-лимфоциты.

Ретроспективная оценка дозы с помощью трёхцветного FISH-метода у разных пациентов, подвергшихся острому аварийному облучению

Е.Е. Ломоносова¹, В.Ю. Нугис¹, М.Г. Козлова¹,
В.А. Никитина¹, И.А. Галстян¹, Г.П. Снигирева²

¹ ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

² ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии
имени академика Н.Н. Бурденко» Министерства Здравоохранения Российской Федерации,
Москва

mrs.lomonosova@gmail.com, nugisvju@list.ru

Современным подходом к цитогенетической ретроспективной индикации полученных доз является использование различных вариантов FISH-метода окраски хромосом культивируемых лимфоцитов периферической крови с помощью цельнохромосомных ДНК-зондов. В настоящей работе была применена трёхцветная FISH-окраска 1, 4 и 12 пар хромосом с помощью ДНК-зондов, произведенных фирмой «MetaSystems» (Германия). Методики постановки культур лимфоцитов периферической крови и приготовления препаратов хромосом были вполне аналогичны, приведенным в рекомендациях МАГАТЭ. FISH-окрашивание хромосом производилось в соответствии с фирменными инструкциями. Для непосредственного цитогенетического анализа использовалась автоматизированная система «Метафер 4» той же фирмы. Анализировали метафазы с квазидиплоидным числом хромосом (40-46) и полным набором всех FISH-окрашенных участков с учётом всей суммарной длины хромосом. Число полных и неполных транслокаций суммировалось.

Материалом для цитогенетических исследований послужила венозная кровь следующих четырёх лиц, пострадавших в различных ситуациях от γ - или γ - β -излучения.

1. Пациент Ф.А.М. (1946 г. рождения), 24.05.1968 г. подвергшийся воздействию радиации будучи дозиметристом на атомной подводной лодке К-27 при аварии реактора. В таких случаях общей особенностью является сочетанный характер поражений от действия проникающего γ -излучения, слабо проникающего облучения кожных покровов из-за внешнего β -излучения от радиационных газов и аэрозолей и ингаляционного загрязнения радиоактивными изотопами йода и других радиоактивных продуктов деления. Дозиметрическая оценка по цитогенетическим данным отсутствовала, была выполнена по сигналам в спектре ЭПР эмали зуба и составила 1,12 Гр. Цитогенетическое исследование лимфоцитов периферической крови с использованием трёхцветного FISH-окрашивания было сделано через 47 лет после радиационного воздействия (возраст пациента — 69 лет).

2. Пациент Ф.А.И. (1967 г. рождения), работая дефектоскопистом, 15-16, а также 23 августа 2000 г., в результате неисправности дефектоскопа и совершения ряда неправильных действий подвергся общему γ -облучению с наличием местных лучевых поражений кистей рук тяжёлой степени. Первичная цитогенетическая оценка средней дозы на всё тело по частоте дицентриков составила 1,9 Гр. Ретроспективная цитогенетическая оценка дозы была произведена через 15,7 лет после инцидента (возраст пациента — 49 лет).

3. Пациент Г.О.И. (1960 г. рождения) пострадал при ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. от преимущественно внешнего относительно равномерного γ - β -излучения при наличии местных лучевых поражений. В ближайшие сроки после облучения наблюдавшаяся частота дицентриков соответствовала средней дозе на всё тело, равной 3,2 Гр. Цитогенетическая ретроспективная оценка доза осуществлялась неоднократно (9 раз) в общем временном промежутке 27,9-34,4 лет после облучения (возраст пациента — 54-60 лет).

4. Пациент Д.Р.И. (1950 г. рождения) во время аварии на Чернобыльской АЭС подвергся воздействию относительно равномерного γ - β -излучения основной массы тела в дозе

4,3 Гр, оцененной по частоте дицентриков. Ретроспективные цитогенетические исследования были выполнены через 30,1 и 30,5 лет после облучения (возраст пациента — 66-67 лет).

У пациентов Г.О.И. и Д.Р.И. статистически значимые различия по частотам транслокаций в культурах лимфоцитов периферической крови, взятой в разное время, отсутствовали, что позволило объединить данные, полученные в разные сроки.

Оценку дозы производили по следующему уравнению, полученному по результатам γ -облучения *in vitro* крови здоровых доноров:

$$Y = C + (1,363 \pm 0,457) \times D + (2,264 \pm 0,187) \times D^2,$$

где Y — частота всех транслокаций на 100 клеток, D — доза, Гр, C — зависящая от возраста фоновая частота транслокаций, которую по литературным данным приняли равной 0,215, 0,231 и 0,318 на 100 клеток для 40-49, 50-59 и 60-69 лет соответственно. Ретроспективные оценки доз у пострадавших Ф.А.М., Ф.А.И., Г.О.И. и Д.Р.И. составили 1,09, 1,24, 2,05 и 2,45 Гр соответственно, т.е., если у первого пациента наблюдалось совпадение исходной и повторной оценок, то у трёх пациентов с наибольшим поражением оценки доз в отдалённые сроки оказались существенно ниже. Линейная зависимость между ретроспективными (D_T) и первоначальными (D_0) оценками доз имела вид:

$$D_T = (0,506 \pm 0,143) + (0,457 \pm 0,049) \times D_0 \quad (r = 0,989 \text{ при } p = 0,011).$$

Её можно в первом приближении использовать для оценок исходных доз в отдалённые сроки после облучения в других случаях.

72 года клиническому отделу радиационной медицины

Н.А. Метляева

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

nmetlyaeva@fmbcfmba.ru

17 сентября 2023 года исполняется 72 года Клиническому отделу радиационной медицины ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России.

По распоряжению начальника 3-го Главного управления при Минздраве СССР генерал-лейтенанта медицинской службы А.И. Бурназяна приказом министра здравоохранения СССР от 17.09.51 года за № 21 на базе Института биофизики МЗ СССР создан Клинический отдел радиационной медицины как сектор № 9. Заведующим сектором № 9 и заведующим терапевтическим отделением назначен доктор медицинских наук, профессор Николай Александрович Куршаков. 2 февраля 1952 года на базе сектора № 9 открыта Клиника радиационной медицины. Организатором и руководителем клиники в течение 13 лет был сам Куршаков. Руководителями Клиники последовательно были доктора медицинских наук: В.С. Смоленский, А.И. Воробьев, А.К. Гуськова, Г.Д. Селидовкин, А.Ю. Бушманов, И.А. Галстян, В.И. Краснюк, А.Ю. Бушманов.

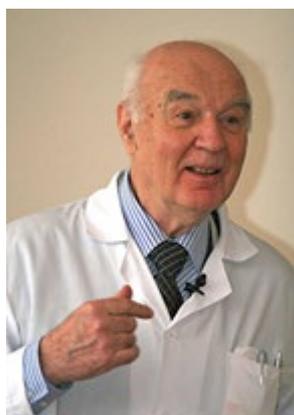
Рис. 1.



Н.А. Куршаков
(1951-1964 гг.)



В.С. Смоленский
(1964-1966 гг.)



А.И. Воробьев
(1966-1974 гг.)



А.К. Гуськова
(1974-1996 гг.)



Г.Д. Селидовкин
(1996-1999 гг.)



А.Ю. Бушманов
(1999-2007 гг.,
2019-2023 гг.)



И.А. Галстян
(2007-2008 гг.)



В.И. Краснюк
(2008-2019 гг.)

Рис. 1. Руководители Клинического отдела радиационной медицины.

Клинический отдел радиационной медицины — специализированная клиника ИБФ МЗ СССР (ныне ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России), создана для изучения состояния здоровья и оказания медицинской помощи работникам предприятий атомной промышленности, работавших над созданием ядерной бомбы, в случае радиационных аварийных ситуаций, а также при тяжелых формах профессиональных заболеваний,

при затруднениях в диагностике лучевых поражений, при необходимости использования новейших методов диагностики и лечения. Основным направлением работы клинического отдела является изучение патогенеза, клиники, диагностики и лечения лучевой болезни у человека. Основными задачами: лечение больных с острой и хронической лучевой болезнью, с местными лучевыми поражениями, а также разработка диагностических, лечебных и профилактических технологий для работников предприятий атомной промышленности и энергетики и других радиационно-опасных объектов.

В структуре клиники с 1949 года были выделены несколько отделений. В 1952 году в клинический отдел входили два терапевтических, неврологическое и хирургическое отделения. Эти подразделения располагались на 5 этаже I корпуса Института биофизики, лаборатории — на 4 этаже. В 1960 году Клинический отдел был переведен на территорию Клинической больницы № 6, отделения были размещены на 7, 8 и 9 этажах I корпуса, на 5 этаже располагалась иммунологическая лаборатория, на 2 этаже — лаборатория электроэнцефалографии (ЭЭГ).

Рис.2.

МИНИСТЕРСТВО
ЗДРАВООХРАНЕНИЯ
Союза ССР
23. октября 1982 г.

Выдается на руки больному или
сопровождающему лицу

НАПРАВЛЕНИЕ № 077
В клинику ин-та биофизики
Направляется на стационарное лечение

тов. Воробьев Николай
(фамилия, имя, отчество)
Васильевич

Диагноз: Лейкемия

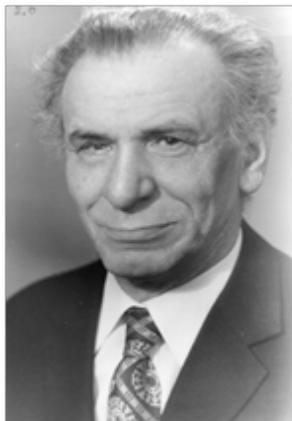
Главный врач Водник 1335

Рис. 2. Направление на стационарное лечение в клинику Института биофизики МЗ СССР.

В клиническом отделе работают врачи-учёные Института биофизики, работал средний и младший медицинский персонал Клинической больницы № 6. Максимальное число сотрудников Клиники доходило до 118-128 человек (1987-2000 гг.), среднего и младшего медицинского персонала — до 125 человек.



И.С. Глазунов
Отделение
радиационной
неврологии



В.Н. Петушков
Отделение МЛП



П.М. Киреев
Терапевтическое
отделение ХЛБ



С.А. Кириллов-
Постников
Терапевтическое
отделение ХЛБ



А.А. Моисеев
лаб. Счетчик
излучения
человека (СИЧ)



Г.П. Груздев
Лаб. радиационной
гематологии



Р.Д. Друтман
Биофизическая
лаборатория



В.В. Благовещенская
Отделение
радиационной
неврологии

Рис. 3. Заведующие отделением, лабораторией.

Первые пациенты из Челябинска-40 (Озерск, ПО «Маяк») стали поступать с 1949 года. Были длительно прослежены судьбы примерно 18 тыс. лиц, начинавших работать на комбинате в 1948-1958 гг.

С 1952 года сотрудники Клиники принимают участие в командировочных выездах для оказания консультативно-методической помощи в МСО/МСЧ отрасли, для работы в экспедиционных комиссиях.

Рис. 4.



Рис. 4. Командировочный выезд в МСО-71 для оказания консультативно-методической помощи, 1954 г. Слева направо: Н.А. Куршаков, Г.Д. Байсоголов, И.С. Глазунов, А.К. Гуськова.

Так с 1953 по 1957 год приняли участие в экспедиционных комиссиях по обследованию населения, проживающего в районе реки Теча, более 15 научных сотрудников и лаборантов (Киреев П.М., Вялова Н.А. Неретин В.Я., Покровская В.Н., Иванова Т.П., Северин С.Ф., Чусова В.Н., Шамордина А.Ф., Гаврилова К.П., Семиглазова Е.Д., Чернега Г.В. и др.).

Рис. 5.



Рис. 5. Комиссионный выезд радиационной бригады для обследования населения, проживающего в районе реки Теча, 1954 г. Слева направо: Н.Е. Роер, Т. Олипер, Н.А. Вялова, А.Ф. Шамордина.

Кроме того, «оторвавшиеся» от ПО «Маяк» бывшие работники с 1966 г. также направлялись для медицинского обслуживания и динамического наблюдения в специализированный стационар.

Рис. 6, рис. 7.



Рис. 6. Отделение хронической лучевой патологии, 1987 г. Верхний ряд (слева направо): С.А. Демидова, Н.Н. Васильева, С.Н. Шкленская, В.Н. Ершова, В.Н. Авдушкина, Г.П. Поселенцева; нижний ряд: Н.А. Метлева, Л.Г. Волкова, Г.Н. Гастева, А.Ф. Шамордина, М.И. Ковалева.



Рис. 7. Сотрудники клинического отдела ИБФ МЗ СССР (1965 г.).

Отдел принимал всех пострадавших в радиационных авариях. С 1949 по 2023 год в отдел поступило более чем 1000 пострадавших в 405 аварийных ситуациях на предприятиях атомной промышленности и энергетики, на атомных подводных лодках (К-19, 1961 и К-27, 1968 гг.) и предприятиях, участвовавших в создании атомной бомбы и испытаниях атомного оружия, из них 864 с клинически значимыми последствиями (ОЛБ+МЛП). Из 405 аварийных ситуаций 140 произошли до аварии на ЧАЭС и 237 — после. Из 258 случаев ОЛБ вследствие аварии на Чернобыльской АЭС 134 случая ОЛБ были тяжелой и крайне тяжелой степени.

С 1974 по 1996 год работой специализированной клиники руководила член-корреспондент РАН, профессор Ангелина Константиновна Гуськова, работавшая с 1949 по 1956 год заведующей неврологическим отделением в медсанчасти № 71 первого атомного предприятия в городе Челябинск-40 (ныне ФГУП «ПО «Маяк», г. Озёрск), с 2008 г. до последних дней жизни (07.04.2015) — главный научный сотрудник ФМБЦ им. А.И. Бурназяна. В 1951 г. защитившая кандидатскую диссертацию «Мультиформные глиобластомы мозга: клинко-гистотопографические типы», в 1957 — докторскую диссертацию, посвященную неврологическим синдромам при лучевой болезни — став первопроходцем в клинической радиационной медицине, проверенной при ликвидации последствий аварии на ЧАЭС. (Лучевая болезнь человека (очерки). М.: Медицина, 1971. 384 с. (в соавт.); *Medical Management of Radiation Accidents. Second edition.* CRC Press, 2001 (соредактор и автор нескольких глав); *Радиационная патология человека // Радиационная медицина. Т. 1. Глава 2.* М.: ИздАТ, 2004. С. 90-121; *Радиационная медицина. Т. 2. Главы: «Этиологические факторы возникновения лучевой болезни человека», «Лучевая болезнь от поступления в организм радионуклидов», «Клиническая токсикология соединений плутония и америция».* М.: ИздАТ, 2004. С. 13-23, 306-368 (в соавт.) *Атомная отрасль страны глазами врача.* М.: Издательство «Реальное время», 2004.)

Основоположником в области хирургических проблем при острых радиационных поражениях стал доктор медицинских наук (1968), заслуженный врач РСФСР, профессор Петушков Вадим Николаевич, работавший с 1950 по 1953 г. в должности главного хирурга и зав. хирургическим отделением МСО-71, с 1953 по 1976 г. — в должности зав. хирургическим отделением и старшим научным сотрудником отдела № 2 Клинической радиационной медицины ИБФ МЗ СССР — по 1988 год. За 38-летнюю трудовую деятельность в отрасли проявил себя высококвалифицированным хирургом-радиологом, хорошо владеющим современными методами обследования больных и обладающим высокой специальной хирургической техникой в области реконструктивной ампутации при местных лучевых поражениях. (Острая радиационная травма у человека. М.: Медицина, 1965. С. 188-207; *Определение степени тяжести острой лучевой болезни по клинической картине первичной реакции (1967) // Избранные материалы «Бюллетеня радиационной медицины».* М.: ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2016. Т. 2. С. 231-240 (в соавт.).)

Волкова Людмила Григорьевна — ветеран Великой отечественной войны (неотложная врачебная помощь и сортировка раненых на передовой линии фронта). С 1949 по 1953 гг. работала в МСО № 31 (Свердловск-44). С 1953 по 2000 год — научный сотрудник отделения хронической лучевой болезни Клинического отдела радиационной медицины (I терапевтическое отделение), в котором с 1949 года разрабатывались вопросы диагностики и лечения острой и хронической лучевой болезни, с 1966 года — хронической профессиональной лучевой патологии. Людмила Григорьевна обследовала и лечила самых тяжелых больных, пострадавших в радиационных авариях на НПО «Маяк» и лиц, получивших крайне высокие дозы внешнего относительно равномерного гамма-облучения и ингаляционное поступление радиоактивных веществ в организм, лечила самых тяжелых больных, пострадавших в аварии на ЧАЭС. Волкова Людмила Григорьевна впервые совместно с Р.И. Макарычевой (рентгенологом) в 1957 году описала клиническую картину плутониевого пневмосклероза, была личным врачом академика РАН И.В. Курчатова, сопровождала его в поездке на Урал на ПО «Маяк». (Л.Г. Волкова «Пневмосклероз как исход хронической лучевой болезни, возникшей в условиях работы на плутониевом производстве», 1959 год; Л.Г. Волкова «Клиника, особенности течения и терапия поражения человека, возникающих в условиях производства плутония», 1961 год; Л.Г. Волкова «Пневмосклероз как исход лучевой болезни, вызванной длительной интоксикацией плутония-239» // *Бюллетень радиационной*

медицины, 1961, № 2а, с. 82-91; Функциональное состояние печени в отдаленном периоде хронической лучевой болезни, обусловленной внешним гамма-облучением в сочетании с инкорпорацией плутония-239 (1979) // Избранные материалы «Бюллетеня радиационной медицины». М.: ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2016. Т.1. С. 417-423 (в соавт.).)

Именно в Клинике и ее весьма редуцированных клинических подразделениях оказались подготовленными к апрелю 1986 года немногочисленные, но реальные силы для оказания медицинской помощи при различных радиационных инцидентах и возможных авариях. Только в ней проводятся систематическое обучение и тренировки аварийных бригад, накапливается собственный и анализируется мировой опыт оказания помощи при общих и местных лучевых поражениях у персонала и отдельных лиц из населения. Проводилась проверка (В.И. Краснюк, Н.А. Метляева, В.М. Крылов и др.) качества медицинского обеспечения работников основного производства, готовности МСЧ, обслуживающих АЭС, к оказанию помощи при аварийной ситуации и тренировочные учения (ЧАЭС, Ново-Воронежская АЭС, Белоярская АЭС, Балаковская АЭС, Кольская АЭС, Калининская АЭС и др.). Совершенствуется тактика ведения предтрансплантационных и других лечебных программ с использованием тотального облучения, с особенным обращением внимания на радиобиологические аспекты проблемы и подготовку персонала к ведению пациентов с подавлением кроветворения различного происхождения (А.Е. Баранов, И.А. Галстян, А.А. Давтян, Т.А. Астрелина и др.). Оптимизировались методы биологической оценки дозы — «дозиметрии без дозиметров» (Г.П. Груздев, Е.К. Пяткин, В.Ю. Нугис, В.Н. Покровская), совершенствуется для целей Клиники «внутренняя» дозиметрия (А.А. Моисеев, Р.Д. Друтман, В.И. Бадьин, В.Н. Яценко, Б.А. Кухта, А.О. Лебедев, Н.П. Поцяпун, А.Г. Цовьянов).

Учитывая многолетний опыт, накопленный отделом № 2 Клинической радиационной медицины, Министерству здравоохранения РФ следует рассмотреть вопрос о введении специальности «Радиационная медицина». При этом одновременно должна постоянно существовать готовность врача любой специальности к практическим адекватным действиям в условиях нештатной ситуации и тем более радиационной аварии крупного масштаба.

Изменение степени метилирования ДНК в лимфоцитах после облучения крови в дозе 1,5 гр *in vitro*

О.С. Цымбал¹, Д.С. Исубакова¹, Т.В. Вишневецкая¹, М.Ю. Цыпленкова¹,
Е.В. Брониковская¹, А.Ф. Николаева², В.О. Сигин², А.И. Калинин², Н.В. Литвяков^{1,3},
И.В. Мильто^{1,4}, Р.М. Тахауов^{1,4}

¹ ФГБУН «Северский биофизический научный центр» ФМБА России,
Северск, Томская область

² ФГБНУ «Медико-генетический научный центр им. акад. Н.П. Бочкова»
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Москва

³ ФГБНУ «Томский национальный исследовательский медицинский центр
Российской академии наук», Томск

⁴ ФГБОУ ВО «Сибирский государственный медицинский университет»
Министерства здравоохранения Российской Федерации, Томск

olga-tsymbal@mail.ru

Ионизирующее излучение охватывает разные сферы деятельности человека: медицина, военная промышленность, производство электроэнергии и другие. Важным направлением исследований последствий радиационного воздействия является изучение эпигенетических процессов, в частности, метилирования ДНК. Метилирование ДНК участвует в регуляции экспрессии генов, репликации, репарации ДНК и других процессах. Воздействие γ -излучения приводит к изменению степени метилирования ДНК, которое у некоторых генов может быть дозозависимым.

Цель исследования — оценить изменение степени метилирования ДНК после острого облучения γ -излучением лимфоцитов крови человека в дозе 1,5 Гр *in vitro*.

В исследовании приняли участие 10 работников объекта использования ионизирующего излучения. В лимфоцитах крови, методом бисульфитного секвенирования ограниченного набора геномных локусов (Reduced representation bisulfite sequencing) с использованием фермента рестрикции XmaI (XmaI-RRBS), оценивали степень метилирования CpG-динуклеотидов до и после острого облучения крови *in vitro* в дозе 1,5 Гр (контрольная и экспериментальная группы, соответственно).

Анализ результатов полногеномного бисульфитного секвенирования методом XmaI-RRBS выявил 41 ген, из которых 26 генов (*HOXD4*, *PADI2*, *FOXK1*, *FTCD*, *PRDM16*, *TOM1*, *PPP1R14A*, *FLNB*, *ORIF1*, *RARA*, *CRTAC1*, *AP5B1*, *ARL5C*, *NOC2L*, *MAMDC4*, *FGFRL1*, *PPFIA3*, *CUX2*, *ANKRD20A19P*, *FAM83H-AS1*, *CBFA2T3*, *POLN*, *MIR4458HG*, *FNBP1*, *SPIRE2*, *ZSCAN10*) имеют тенденцию к гипометилированию по крайней мере в 50 % образцов экспериментальной группы, а 15 генов (*CHRNA4*, *SEPTIN9*, *ZNF174*, *ELK3*, *NFAM1*, *ALG10*, *SOX8*, *KLHL30*, *UR11*, *HBZ*, *KLF14*, *MYO16*, *MYEOV*, *DMKN*, *PAX7*) имеют тенденцию к гиперметилированному состоянию по крайней мере в 50 % образцов экспериментальной группы. При этом гипометилирование ДНК характерно для восходящих областей и промотора. Выявлено также частичное гиперметилирование после облучения лимфоцитов крови *in vitro* внутри интрона гена *GSTP1*, для которого Кузьминой Н.С. и др. (2014, 2016) было показано aberrантное метилирование промотора после хронического воздействия ионизирующего излучения.

Анализ функционального обогащения с использованием онтологии генов (Gene Ontology, GO) биологических процессов показал, что гены с гипометилированными CpG-динуклеотидами после облучения играют роль в положительной регуляции дифференцировки жировых клеток, отрицательной регуляции развития хряща, обонятельной луковицы, обонятельной доли и движения на основе актиновых филаментов. Гены с гиперметилированными CpG-динуклеотидами после облучения участвуют в катаболизме пуриновых нуклеотидов, регуляции дифференцировки миобластов, активации лейкоцитов, рецепторов, связанных с G-белком, передаче сигналов фермента фосфоинозитол-3-киназы (PI3K) и дифференцировке различных клеток.

Таким образом, гипо- и гиперметилированные гены после облучения γ -излучением играют важную роль в клеточных процессах, таких как пролиферация, рост и дифференцировка, регуляция транскрипции и экспрессии генов, репарация и репликация ДНК, а также участвуют в иммунном ответе и воспалении.

В целом, гены, выявленные в настоящем исследовании, могут быть использованы при разработке диагностических маркеров воздействия ионизирующего излучения. Регистрация дифференциального метилирования CpG-динуклеотидов возможна с применением наиболее простого скринингового метода анализа метилирования ДНК — метилчувствительной ПЦР.

Опыт лечения комбинированного радиационного поражения у работника предприятия атомной промышленности (ФГУП «ПО «Маяк»)

И.А. Вологодская¹, Г.Ф. Савина¹, А.В. Ефимов², С.А. Сышко², Т.В. Азизова^{1,2}

¹ ФГБУЗ КБ № 71 ФМБА России, Озерск, Челябинская область

² ФГБУН «Южно-Уральский институт биофизики» ФМБА России,
Озерск, Челябинская область

vologodskaya.i@mail.ru

Комбинированные радиационные поражения (КРП) возникают при одновременном или последовательном воздействии на организм ионизирующих излучений и поражающих факторов нелучевой этиологии. Степень тяжести КРП, и соответственно, прогноз для жизни и здоровья пострадавших зависит от вида и тяжести компонентов поражения. Сочетание нескольких поражающих факторов приводит к возникновению синдрома взаимного отягощения. Чаще всего это касается комбинации острых лучевых поражений с термическими ожогами и (или) механическими травмами (Бутомо Н.В. с соавт., 2004). Химические ожоги кожи вызывают изменения тканей, зависящие от физико-химических свойств раздражителя. Так, концентрированные кислоты вызывают коагуляцию тканевых белков с образованием сухого струпа. Развивается коагуляционный некроз, а некротические ткани служат барьером для дальнейшего проникновения кислоты вглубь (Профессиональная патология: национальное руководство / под ред. Н.Ф. Измерова). Характер взаимодействия двух поражающих агентов (воздействие азотной кислоты с одновременной контаминацией кожных покровов актинидами) имел для нас определенный научно-практический интерес. Описание данного клинического случая и явилось предметом нашей работы.

Т-в М.В., 1982 г.р., электрогазосварщик радиохимического завода; стаж работы 8 лет; класс условий труда 3,4, работа в условиях контакта с вредными факторами химической, физической природы, тяжестью трудового процесса. Поступил в Центр профессиональной радиационной патологии (ЦПРП) на внеочередное медицинское обследование в связи с нештатной ситуацией. Во время выполнения ремонтных работ трубопровода в дневную смену опустился на колени, почувствовал жжение в области коленной чашечки левого коленного сустава. Дозиметрические замеры показали загрязнение кожных покровов в пораженной области в количестве 162 альфа-частицы х мин/см². После санобработки в санпропускнике водно-мыльным раствором и Раддезом направлен в здравпункт (через 3 часа после инцидента), где ему провели обработку кожных покровов 5% раствором пентацина и наложили асептическую повязку. По данным измерений на установке СИЧ в лаборатории внутренней дозиметрии ФГБУН ЮУрИБФ ФМБА России активность в области травмы ²⁴¹Am составила 0,7 ± 0,2 Бк, ²³⁹Pu — 80 ± 10 Бк.

При осмотре дежурным врачом ЦПРП места травмы в области левого коленного сустава: струп желтого цвета диаметром 5 см с полосой гиперемии шириной 0,5-1,5 см по периферии. Дежурным травматологом был поставлен диагноз «Химический ожог левого коленного сустава I степени менее 1 % поверхности тела». Учитывая относительно большую площадь и анатомические особенности места поражения (отсутствие подкожно-жирового слоя, постоянное натяжение кожных покровов при функционировании сустава), а также комбинированный характер травмы, было принято решение о нецелесообразности хирургической дезактивации (иссечения) и о проведении консервативного лечения (повязки с 5 % раствором пентацина). После появления на 3 день очагов нагноения диаметром 0,2 мм по периферии струпа к лечению были добавлены повязки с левосином. Активность актинидов в области поражения сохранялась на прежнем уровне, вследствие чего было высказано предположение, что актиниды оказались замурованными в струп. Повязки с пентацином были отменены. На 10 день струп стал фрагментироваться и отходить, под ним определялся поверхностный дефект кожи диаметром 3,0 см без признаков воспаления, розовые грануляции. На 10 день болезни струп отошел. При обследовании раны на установке СИЧ без повязки — содержания актинидов в месте повреждения кожи не было зарегистрировано.

На 17 день сформировалась гранулирующая рана размером 1,5*2,5 см с краевой эпителизацией. Был выписан на амбулаторное лечение, хирургом назначено лечение: аэрация, орошение раствором мирамистина, обработка пеной Пантенол. С начала госпитализации проведен курс хелатотерапии (внутривенное струйное введение 10,0 мл 5 % раствора пентамина один раз в день, 10 инъекций).

В ходе заключительного дозиметрического исследования трех суточных проб мочи, собранных после окончания действия хелатотерапии, содержание изотопов плутония и америция-241 не превысило нижнего предела диапазона измерения метода альфа-спектрометрического определения актинидов в биосубстратах. Поступления изотопов плутония и америция-241 в организм через поврежденную кожу на достоверно детектируемом уровне не зарегистрировано. Значение 50-летней ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения — ниже уровня регистрации. Дальнейшего контроля содержания актинидов в месте повреждения кожи не требуется. По результатам окончательного клинического и биофизического обследования в ВК ЦППП была проведена экспертиза профпригодности с итоговым медицинским заключением: «Работник признан пригодным по состоянию здоровья к выполнению отдельных видов работ».

Таким образом, выбранная нами тактика консервативного лечения при КРП оказалась эффективной, позволила избежать излишней травматизации при хирургическом вмешательстве, что сократило сроки нетрудоспособности и предотвратило возможное поступление актинидов в организм работника предприятия.

**Оценка влияния низких доз облучения
на заболеваемость катарактой среди населения,
облучившегося на реке Теча и Восточно-Уральском радиоактивном следе**

Л.Д. Микрюкова

ФГБУН «Уральский научно-практический центр радиационной медицины» ФМБА России,
Челябинск
mik@urcrm.ru

В последнее время в центре внимания отечественных и зарубежных исследований находится проблема оценки доз облучения, влияющих на развитие катаракты. Целью данной работы было провести эпидемиологический анализ заболеваемости катарактой и оценить риск развития данного заболевания в различных группах пострадавшего населения за период с 1955 по 2019 гг. В отличие от однократного кратковременного облучения, при длительном хроническом воздействии наряду с повреждением протекают и восстановительные процессы.

Исследуемая когорта включала 14751 человек, наблюдавшихся в клиническом отделении УНПЦ РМ за период с 1955 по 2019 гг. Всего было установлено 4658 случаев катаракты. В настоящем анализе учитывались все впервые установленные случаи катаракты за весь период наблюдения. В основе статистических методов применялся метод «случай-контроль». При оценке дозовой зависимости были использованы индивидуальные дозы облучения хрусталика, рассчитанные по усовершенствованной версии дозиметрической системы TRDS-2016. Средняя по выборке доза составляет 54 мГр. Вклад внешнего облучения в суммарную дозу на хрусталик превалировал, составляя в среднем 67 %.

По результатам исследования у лиц, подвергшихся многолетнему воздействию ионизирующей радиации в малых и средних дозах, была установлена тенденция повышенного влияния дозы облучения на увеличение риска появления катаракты: отношение шансов при развитии катаракты в зависимости от дозы облучения хрусталика составило 1,10 (95 % ДИ: 1,00-1,21), что свидетельствует о пограничных значениях статистической значимости ($p < 0,05$).

Также было проведено изучение влияния на заболеваемость катарактой у лиц, подвергшихся хроническому радиационному воздействию, следующих социально-демографических факторов риска: этническая принадлежность, место жительства, условия труда, семейное положение, уровень образования. Получены следующие результаты:

- катаракта чаще развивается в группе тюркитов (татары/башкиры) по сравнению с группой славян;

- риск заболеть катарактой больше у жителей города по сравнению с сельскими жителями;

- риск заболеть катарактой больше у лиц, занимающихся преимущественно умственным трудом;

- при исследовании зависимости заболевания катарактой от семейного положения пациента установлено, что риск заболеть катарактой больше у лиц, не имеющих партнера (не женат/разведен/ вдова или вдовец);

- риск заболеть катарактой больше у лиц, имеющих только начальное образование, чем у пациентов с высшим или средне-специальным образованием.

При изучении влияния соматических заболеваний на риск развития катаракты у лиц, подвергшихся хроническому радиационному воздействию, установлена статистически значимая зависимость при наличии артериальной гипертензии, сахарного диабета, цереброваскулярных заболеваний.

Аддитивные временные компоненты ответных реакций психофизиологических тестов как источник новой дополнительной диагностической информации о функциональном состоянии ЦНС специалистов аварийно-спасательных формирований

С.В. Новиков, В.Н. Шлапак

ФГУП «Научно-технический центр радиационно-химической безопасности и гигиены» ФМБА России, Москва
ntcrhbg@mail.ru

К специалистам профессиональных аварийно-спасательных служб и формирований, а также нештатных аварийных медико-санитарных формирований, привлекаемых к реагированию на аварийные ситуации и инциденты с вовлечением радиоактивных веществ, предъявляются определённые требования: наличие медицинского освидетельствования о годности к работе, высокие уровни профессиональной, физической подготовки, морально-психологических качеств.

В специализированной литературе отмечается, что существующие методы и средства психофизиологического обеспечения, используемые в лабораториях психофизиологического обследования и обеспечения надежности персонала, не в полной мере соответствуют требованиям по оперативности и достоверности контроля профессиональной надёжности специалистов, участвующих в реагировании на аварийные ситуации и инциденты с вовлечением радиоактивных веществ. В частности, это касается надёжности как функции состояния центральной нервной системы (ЦНС). Поэтому разработка новых оперативных методов, уточняющих и детализирующих функциональное состояние (ФС) ЦНС являются актуальным.

В этом плане, применительно к условиям дефицита времени, практический интерес представляют не только определение среднего времени ответной реакции (t_{cp}) на поступающие сигналы (стимулы психофизиологических тестов), но и определение его аддитивных составляющих:

- временных затрат на опознание сигнала в ассоциативной коре головного мозга — трансформация сигнала в образ (t_1);
- временные затраты на извлечение имеющихся в кратковременной памяти (энторинальная кора, гиппокамп) для сравнения с поступившим образом и на само сравнение (t_2);
- временных затрат на формирование мотивации ответной реакции (в гипоталамусе, t_3);
- временных затрат на формирование определенных команд, которые поступят к исполнительным органам (эфферентный синтез, t_4);
- временных затрат на передачу и выполнение команды исполнительным органам — эффекторам (мышцам, t_5).

Содержательная постановка задачи оценки аддитивных временных составляющих состоит в следующем. Имеются следующие исходные данные:

- временные ряды ответных сенсомоторных реакций $t_j^{эксн}$ ($j=1, \dots, N$), регистрируемых в стандартных психофизиологических тестах;
- обоснованное положение о том, что каждое из значений $t_j^{эксн}$ состоит из суммы аддитивных временных компонент t_i (t_1, t_2, t_3, t_4, t_5);
- существующее представление о том, что последовательную трансформацию в ЦНС сенсорной информации (от её начальной стадии — регистрации сигнала-стимула в зрительной системе до конечной стадии — двигательной реакции) отражает временная последовательность вызванных потенциалов (ВП), временные диапазоны которых известны из нейрофизиологии.

Исходя из этого необходимо определить временные компонент t_i .

Метод количественной оценки временные компонент заключается в формулировке выражения для оценки среднеквадратической суммы времён отклонений $F = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^5 \sqrt{(t_j^{(эксп)} - t_i^{(j)})^2}$ и использования математических способов решения оптимизационных задач, в которых информация о допустимых диапазонах изменения времён ВП используется при формулировке ограничений на допустимые диапазоны изменения t_i .

Математическая постановка этой задачи сформулирована в виде оптимизационной задачи по поиску минимума функционала $F(t_j^{(эксп)}, t_i)$, в котором разность $(t_j^{(эксп)} - t_i^{(j)})$ является источником невязки (величины «расхождения» приближённого равенства) для j экспериментальной точки.

Для решения этой оптимизационной задачи использован численный метод нелинейной глобальной оптимизации, содержащийся, в частности, в математическом пакете Wolfram Mathematica.

Апробация разработанного Метода показала, что он существенно менее трудоёмок, по сравнению с используемыми нейрофизиологическими методами и имеет достаточно высокую информативность. Метод позволяет выделить и оценить такие характеристики мозговых процессов, которые скрыты от наблюдения при использовании традиционных методов психофизиологии.

По результатам оперативного обследования с применением данного метода в аппаратно-программных комплексах выявляются лица с признаками ослабления/нарушения когнитивных функций, связанных с механизмами восприятия и обработки информации, что важно для снижения риска возникновения нештатных ситуаций, обусловленных «человеческим фактором», и срыва выполнения задач при реагировании на аварийные ситуации и инциденты с вовлечением радиоактивных веществ.

Структурные нарушения генома у лиц, подвергшихся внутриутробному облучению

О.А. Синельщикова, В.Л. Рыбкина, Г.В. Жунтова, Т.В. Азизова

ФГБУН «Южно-Уральский институт биофизики» ФМБА России,
Озерск, Челябинская область
clinic@subi.su

В результате использования источников ионизирующего излучения (ИИ) в промышленности, ядерной энергетике и медицине; применения ядерного оружия в г. Хиросима и Нагасаки в Японии, проживания на загрязненных радионуклидами территориях после аварии на Чернобыльской атомной станции (ЧАЭС) и в населенных пунктах вдоль р. Теча, в которую осуществляли сброс радиоактивных отходов производственного объединения (ПО) «Маяк», и вблизи Семипалатинского полигона, где проводились наземные испытания ядерного оружия, произошло облучение беременных женщин, что особенно неблагоприятно, поскольку в период внутриутробного развития клетки зародыша, эмбриона и плода высоко радиочувствительны.

В настоящее время эмбрион и плод могут подвергаться облучению в результате лучевой терапии злокачественных новообразований (ЗНО) и при проведении рентгенодиагностических процедур у беременных женщин.

Одними из самых радиочувствительных субклеточных структур организма являются хромосомы и их составные части — гены, последствия повреждения которых во внутриутробном периоде могут быть самыми разнообразными: гибель эмбриона и плода, формирование врожденных пороков развития и неблагоприятных соматических эффектов после рождения (стохастические эффекты).

Цель настоящего исследования — оценка структурных нарушений генома у лиц, подвергшихся внутриутробному облучению.

Было проведено цитогенетическое исследование потомков работниц ПО «Маяк», подвергшихся внутриутробному облучению в результате профессиональной деятельности их матерей (основная группа), а также контрольной группы — лиц, не подвергавшихся внутриутробному облучению.

Основную группу составили 27 человек (78 % женщин), подвергшихся внутриутробному облучению; в контрольную группу включены 28 человек (93 % женщин).

Средний возраст на момент обследования был 66,9 (стандартное отклонение (СО) — 1,8) лет в основной группе и 65,2 (СО — 5,2) лет в контрольной группе. В исследовании использованы поглощенные в костном мозге (КМ) дозы внешнего гамма-излучения дозиметрической системы работников ПО «Маяк» «ДСРМ-2013». Средняя суммарная доза внешнего гамма-излучения, поглощенная в КМ матерей в период беременности, в основной группе составила 0,12 Гр.

Всего в основной группе было проанализировано 5400 метафаз, в контрольной группе — 5600 метафаз.

В результате проведенного цитогенетического исследования потомков работниц ПО «Маяк», подвергшихся внутриутробному облучению, зарегистрированы хромосомные aberrации (ХА) как хроматидного, так и хромосомного типа. К нестабильным aberrациям хроматидного типа относили хроматидные разрывы (ХР), ацентрические фрагменты (АФ). ХА были представлены транслокациями и делециями.

Частота стабильных ХА в целом и транслокаций, в частности, была статистически значимо выше в основной группе по сравнению с контрольной группой. Не выявлено статистически значимых различий в частоте делеций, нестабильных ХА в целом, АФ и ХР между основной и контрольной группами.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными исследования лиц, подвергшихся антенатальному облучению в результате ядерной бомбардировки в Хиросиме и Нагасаки.

Кроме того, выявлена прямая корреляция количества стабильных aberrаций в целом ($r = 0,69$; $p < 0,05$) и транслокаций, в частности, ($r = 0,57$; $p < 0,05$) с суммарной дозой внешнего гамма-излучения, поглощенной в КМ матери в период беременности.

Доля лиц со стабильными ХА, в том числе с транслокациями, в основной группе была статистически значимо больше, чем в контрольной группе.

В результате цитогенетического исследования установлено статистически значимое увеличение частоты стабильных ХА (преимущественно за счет транслокаций) у потомков, подвергшихся внутриутробному облучению, по сравнению с контрольной группой.

Динамика содержания маркеров атеросклеротического поражения сосудов у работников, подвергшихся хроническому облучению

Д.С. Ослина, В.Л. Рыбкина, Г.В. Адамова, Т.В. Азизова

ФГБУН «Южно-Уральский институт биофизики» ФМБА России,
Озерск, Челябинская область
clinic@subi.su

Результаты эпидемиологических исследований свидетельствуют о том, что воздействие ионизирующего излучения увеличивает риск сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ). В экспериментальных исследованиях показано, что ионизирующее излучение оказывает повреждающий эффект на эндотелий сосудов и способствует развитию хронического воспаления и атеросклеротического поражения сосудистой стенке. Исследование биомаркеров атеросклероза дает возможность оценить вклад ионизирующего излучения в патогенез атеросклероза у лиц, подвергшихся облучению.

Целью данного исследования динамики содержания некоторых маркеров атеросклеротического поражения сосудов у работников, подвергшихся влиянию ионизирующего излучения.

В исследование были включены 20 работников ПО «Маяк» (14 мужчин и 6 женщин; средний возраст на начало исследования $67,9 \pm 6,8$ лет), подвергшихся пролонгированному сочетанному внешнему гамма- и внутреннему альфа-облучению, никогда на принимавших участие в ликвидации последствий радиационных аварий, не проживавших на радиоактивно-загрязненной территории и не имевших злокачественных новообразований (ЗНО), острых воспалительных процессов и обострений хронических воспалительных заболеваний в период обследования. Медианное значение суммарной поглощенной в печени дозы внешнего гамма-излучения составило 0,11 Гр (диапазон от 0,01 до 0,76 Гр); медианное значение суммарной поглощенной в печени дозы внутреннего альфа-излучения — 0,01 Гр (от 0,02 до 0,27 Гр).

Методом твердофазного иммуноферментного анализа в сыворотке периферической крови у всех участников исследования определено содержание маркеров атеросклероза (АРОА1, АРОВ и соотношение АРОВ/АРОА1, CRP, SOD, MCP-1) согласно рекомендациям производителей тест-систем. Повторное исследование этих же маркеров проведено через 10 лет. Статистическую обработку проводили с помощью пакета программ «Statistica 10». Характер распределения исследованных параметров определяли по методу Колмогорова-Смирнова. Достоверность различий оценивали по критерию Манна-Уитни и критерию Уилкоксона. Нулевая гипотеза отвергалась при $p < 0,05$.

Установлено, что медианная концентрация АРОВ в сыворотки крови обследованных лиц превышала референсные значения для этого показателя как при первичном, так и при повторном исследовании. Соотношение АРОВ/АРОА1 в основной группе также было выше референсных значений на обоих этапах исследования. Значение медианной концентрации CRP соответствовало среднему риску развития сердечно-сосудистых заболеваний на первом этапе исследования, и высокому риску — при повторном обследовании.

Повторное исследование маркеров через 10 лет после первого обследования выявило статистически значимое повышение концентрации АРОВ (1,92 (1,67-2,12) г/л и 3,51 (2,25-4,46) г/л, соответственно; $p = 0,0013$), CRP (1,46 (0,45-3,2) мг/л и 3,01 (2,01-5,56) мг/л, соответственно; $p = 0,0137$) и SOD (31,53 (17,5-35,05) нг/мл и 64,61 (49,43-65,14) нг/мл, соответственно; $p = 0,0001$).

Статистически значимое повышение содержания АРОВ при повторном исследовании может свидетельствовать об отрицательной динамике этого показателя и развитии более выраженной дислипидемии у работников, подвергшихся пролонгированному сочетанному внешнему гамма- и внутреннему альфа-облучению. Высокое значение концентрации CRP при повторном исследовании свидетельствует о повышенном риске развития осложнения

сердечно-сосудистых заболеваний. Повышение концентрации SOD может указывать на напряжение систем антиоксидантной защиты, обусловленное хроническим облучением.

Таким образом, результаты повторных исследований позволяют предположить, что у работников, подвергшихся профессиональному сочетанному (внутреннему альфа- и внешнему гамма-) облучению, через 10 лет после первоначального обследования регистрируются более выраженные изменения, указывающие на наличие воспаления, дислипидемии и окислительного стресса, способствующие интенсивному развитию атеросклероза. В дальнейших исследованиях планируется сравнение динамики атеросклеротического процесса у работников, подвергшихся хроническому профессиональному облучению, и у лиц, не имевших контакта с ионизирующим излучением.

Влияние фракционированного гамма-облучения на показатели поведения у мышей

Н.И. Атаманюк^{1,2}, Е.А. Пряхин¹

¹ ФГБУН «Уральский научно-практический центр радиационной медицины» ФМБА России, Челябинск

² ФГБОУ ВО Челябинский государственный университет, кафедра радиационной биологии, Челябинск
vita_pulhira@mail.ru

Облучение в высоких дозах (более 1 Гр) является признанным фактором развития когнитивной дисфункции у человека. Однако остается противоречивой и недостаточной информация о возможном влиянии ионизирующего излучения в диапазоне малых (до 0,1 Гр) и средних (от 0,1 до 1 Гр) доз на развитие когнитивной дисфункции, тревожных и депрессивных расстройств, нейродегенеративных заболеваний у человека. Экспериментальные работы на мелких лабораторных животных показывают, что при остром облучении в малых и средних дозах у животных выявляется ряд поведенческих изменений, однако данных о влиянии хронического или фракционированного облучения на данные показатели крайне мало.

В настоящей работе оценивали влияние фракционированного гамма-облучения в кумулятивной дозе 0,1 Гр, 1 Гр и 5 Гр на показатели тревожного поведения у мышей C57Bl/6. Животные получали по 20 равных фракций общего внешнего гамма-облучения ежедневно, 5 дней в неделю в течение 4 недель, на установке ИГУР-1М (¹³⁷Cs-источники, мощность дозы 0,91 Гр/мин, неравномерность гамма-поля в рабочем пространстве не более 10 %). Облучали мышей в период новорожденности с 1-3 дня жизни в домашних клетках, на время облучения кормящих самок из клеток удаляли. Было сформировано 2 группы контроля: биологический контроль (БК) — с животными не проводили никаких манипуляций; и группа ложного облучения 0 Гр — животные повергались ежедневно тем же манипуляциям, что и при облучении.

В возрасте 1 месяц мышей рассаживали по 10 особей в отдельные клетки. У животных оценивали показатели поведения в возрасте 1-1,5 месяцев методом приподнятого крестообразного лабиринта и с помощью теста на закапывание стеклянных шариков (marble burying test). В каждой группе было протестировано не менее 40 мышей.

Тест на закапывание стеклянных шариков (marble burying test) у грызунов характеризует меру неофобного и компульсивноподобного поведения, возникающего после стрессовых воздействий, по числу закопанных шариков, равномерно расположенных в центре тестовой клетки. Выявлено, что стресс, связанный с процедурами облучения животных, не оказал влияния на данный тип поведения: число закопанных шариков в группах БК и 0 Гр не отличалось. Наибольшее число закопанных шариков наблюдалось в группе 0,1 Гр (при сравнении с объединенным контролем БК и 0 Гр $t_{210}=7,18$; $p < 0,001$). Группа, облученная в кумулятивной дозе 1 Гр, не имела отличий от необлученных контрольных групп. В группе 5 Гр отмечено минимальное число закопанных шариков (при сравнении с объединенным контролем $t_{243}=6,07$; $p < 0,001$). При этом зависимость числа закопанных шариков в диапазоне доз 0,1-5 Гр была линейная ($R^2=0,31$; $F=122$; $p < 0,001$).

В тесте приподнятого крестообразного лабиринта степень тревожности животных оценивается по времени, проведенном в открытых, ярко освещенных, и закрытых, затененных рукавах лабиринта. В группе 0 Гр мыши проводили меньше времени в открытых рукавах (трактуется как более выраженная тревожность), чем в группе БК ($t_{78}=2,58$; $p=0,01$). Мыши, облученные в дозе 0,1 Гр, не имели отличий от группы ложного облучения 0 Гр. В группах с кумулятивной дозой облучения 1 и 5 Гр не было выявлено отличий от БК по большинству показателей поведения в лабиринте. Однако у животных в группе 5 Гр по сравнению с группами БК и 1 Гр была снижена локомоторная активность по показателю общего числа заходов в рукава лабиринта (при сравнении с БК $t_{93}=2,63$; $p=0,01$).

Результаты двух проведенных тестов характеризуют животных, облученных в дозе 5 Гр, как имеющих наименее склонный к тревоге фенотип, а облученных в дозе 0,1 Гр как наиболее склонных к тревожному и компульсивноподобному поведению. Эти изменения, выявляемые в методе приподнятого крестообразного лабиринта, могут быть объяснены стрессовым вмешательством, связанным с ежедневным облучением мышат в течение 1-го месяца жизни. Но тест на закапывание стеклянных шариков, характеризующий, вероятно, иной аспект поведения, связанного с тревогой в новой обстановке, показывает влияние фракционированного облучения в дозе 0,1 Гр на формирование более тревожного фенотипа у мышей.

Оценка радиозащитного действия липосомальной формы меркаптоэтиламина

Н.А. Обвинцева

ФГБУН «Уральский научно-практический центр радиационной медицины» ФМБА России,
Челябинск
n_obvintseva@mail.ru

Цель работы: оценка радиозащитного действия липосомальной формы радиопротектора меркаптоэтиламина (меркамина) методом эндогенного колониеобразования.

Материалы и методы. Исследования проводили на самцах мышей стока CD1 (питомника ИЦиГ СО РАН, г. Новосибирск) в возрасте 2,5-3 месяца, масса 24-28 г. Животных содержали в стандартных условиях. Облучение животных проводили с помощью гамма-установки ИГУР-1М Экспериментального отдела ФГБУН УНПЦ РМ в дозе 4,25 Гр при мощности дозы 0,77 Гр/мин. Было сформировано 4 группы по 12 животных в каждой: 1.«Облученный контроль» — животным вводили стерильную деионизированную воду по 0,2 мл внутривенно за 30 мин до облучения; 2. «Меркамин» — животным вводили внутривенно по 0,2 мл раствора меркамина в концентрации 205 мг/кг за 30 мин до облучения; 3. «Пустые липосомы» — животным вводили препарат, содержащий пустые липосомы (10 мг/мл фосфолипидов) по 0,2 мл внутривенно за 30 мин до облучения; 4.«Липосомы с меркамином» — животным вводили липосомы, содержащие меркамин (205 мг/кг меркамина, 10 мг/мл фосфолипидов) по 0,2 мл внутривенно за 30 мин до облучения. На 9-е сутки после облучения лабораторных мышей подвергали эвтаназии методом дислокации шейных позвонков. Подсчёт количества ядросодержащих клеток периферической крови и костного мозга производили с помощью цитометра Picoscale. Выделенную селезёнку взвешивали, фиксировали в спирт-уксусном фиксаторе, после чего производили подсчёт количества колоний при помощи бинокулярного микроскопа Zeiss Discovery V12.

Результаты. В таблице представлены результаты измерений исследуемых показателей.

В группе облученного контроля количество эндоколоний в селезенке (КОЕс) в среднем составляло $7,7 \pm 1,8$; масса селезёнки — $31,6 \pm 1,5$ мг, масса тимуса — $17,1 \pm 1,7$ мг, количество ядросодержащих клеток в периферической крови (ЯСК ПК) — $(3,8 \pm 0,3) \cdot 10^6$ клеток/мл, количество ядросодержащих клеток в костном мозге (ЯСК КМ) — $(13,1 \pm 1,0) \cdot 10^6$ клеток/бедро.

Таблица – оценка радиозащитного действия липосомальной формы радиопротектора меркамина методом эндотеста.

Группа	Масса мышы, г	Масса селезёнки, мг	Масса тимуса, мг	Количе- ство КОЕс в селезёнке	ЯСК ПК, *10 ⁶ /мл	ЯСК КМ, *10 ⁶ /бедро
Облучённый контроль, 4,25 Гр	26,3±0,9	31,6±1,5	17,1±1,7	7,7±1,8	3,8±0,3	13,1±1,0
Облучение 4,25 Гр + Меркамин, 205 мг/кг	26,4±1,1 t=0,1; p=0,95	38,0±1,9 t=2,6; p=0,016	20,2±2,0 t=1,2; p=0,25	13,3±2,0 t=2,1; p=0,048	6,3±0,5 t=4,4; p < 0,001	16,5±0,9 t=2,6; p=0,017
Облучение 4,25 Гр + Пустые липосомы, (фосфолипиды, 10 г/л)	25,6±1,0 t=0,5; p=0,61	29,1±1,5 t=1,2; p=0,25	18,3±1,7 t=0,5; p=0,6	6,7±1,1 t=0,5; p=0,64	3,6±0,3 t=0,6; p=0,054	12,6±1,0 t=0,3; p=0,08

Облучение 4,25 Гр + Липосомальный меркамин	24,9±0,8 t=1,1; p=0,27	43,1±2,7 t=3,7; p=0,001	23,4±2,0 t=2,4; p=0,023	23,2±1,7 t=6,2; p<0,001 *t=3,8; P<0,001	5,9±0,3 t=4,7; p<0,001	18,5±0,7 t=4,4; p<0,001
---	------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	---	------------------------------	-------------------------------

Примечание: *t* — коэффициент Стьюдента; ЯСК ПК — ядросодержащие клетки в периферической крови; ЯСК КМ — ядросодержащие клетки в костном мозге, КОЕс — колонеобразующие единицы в селезёнке; *p* — уровень статистической значимости при сравнении с группой «Облученный контроль, 4,25 Гр»; **p* — уровень статистической значимости при сравнении с группой «Облучение 4,25 Гр + меркамин, 205 мг/кг».

Введение мышам меркамина за 30 мин до облучения привело к статистически значимому увеличению количества эндоколоний в селезёнке мышей на 73 % (таблица), увеличению массы селезёнки на 20 %, увеличению ЯСК ПК на 65 %, увеличению ЯСК КМ на 26 % по сравнению с облучённым контролем. Применение же липосомальной формы меркамина привело к более выраженным статистически значимым отличиям от облучённого контроля по сравнению с эффектом раствора меркамина. Так, наблюдалось увеличение числа эндоколоний на 200 % (у отдельных животных наблюдался сплошной рост колоний), массы селезёнки на 36 %, ЯСК ПК — на 54 %, ЯСК КМ — 42 % и статистически значимому увеличению массы тимуса на 37 %. Применение липосомальной формы меркамина приводило к почти двухкратному повышению выживаемости кроветворных стволовых клеток (КОЕс) по сравнению с эффектом раствора меркамина. В группе, где животным вводили пустые липосомы, статистически значимых отличий от показателей группы облучённого контроля не наблюдалось.

Вывод. Таким образом, проведённые эксперименты показывают, что липосомальная форма меркаптоэтиламина (меркамина) оказывает более выраженное радиозащитное действие, чем водный раствор меркамина в той же концентрации.

4. Радиоэкология

Дендроиндикация последствий Кыштымской аварии методами дендрохронологии и цифровой анатомии древесины

М.В. Модоров, В.В. Кукарских, А.В. Комарова, В.А. Бессонова

ФГБУН «Институт экологии растений и животных» УрО РАН, Екатеринбург
mmodorov@gmail.com

Регистрирующие структуры древесных растений позволяют детектировать климатические сигналы, датировать взрывы сверхновых звезд, происходившие сотни лет назад, уточнять исторические ареалы животных и т.д. (Büntgen et al., 2018; Hantemirov et al., 2022; Косинцев и др., 2022). В ряде работ было показано, что они также могут быть использованы в радиоэкологическом мониторинге. Как правило, авторы ищут связь между уровнем радиоактивного загрязнения территории и шириной годичных колец, а также характеристиками анатомии древесины (Holiaka et al., 2020; Kukarskih et al., 2021; Netsvetov et al., 2023). Помимо этого, получили развитие исследования, в которых для мониторинга выбросов АЭС проводят анализ изотопов углерода, депонированных в годичных кольцах древесины (Nazarov et al., 2022).

Кыштымская авария, произошедшая в сентябре 1957 года, привела к попаданию в природные экосистемы около $7.4E+16$ Бк радиоактивных веществ, значительная часть которых осела в районе взрыва. Загрязненная территория получила название Восточно-Уральский радиоактивный след (ВУРС). Наиболее заметной реакцией биоценозов в первые годы после Кыштымской аварии стала гибель сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*) на площади около 50 км^2 , а также заметное угнетение роста сосны на площади около 80 км^2 (Алексахин и др., 2004). Ранее нами было показано, что в настоящее время в зоне ВУРСа присутствуют сосны старше 1950 года рождения, уменьшение прироста годичных колец которых в период с 1959 по 1962 годы в явном виде демонстрирует реакцию на аварию 1957 года (Kukarskih et al., 2021). По-видимому, эти сосны, а также березы ВУРСа, являются последними элементами природных экосистем, несущими информацию о реакции биоты в начальный период после Кыштымской аварии. В докладе мы рассмотрим биологические маркеры древесных растений, которые могут быть индикаторами радиоактивного загрязнения биоценозов. Для этого нами были изучены несколько десятков переживших Кыштымскую аварию деревьев сосны обыкновенной.

Керны с деревьев были отобраны в 2021-2023 годах на удалении около 5-10 км от места Кыштымской аварии на участке с современным уровнем загрязнения почвы стронцием-90 около $1-6 \text{ МБк/м}^2$ (участок «Impact2» в работе Kukarskih et al., 2021). С одной стороны этот участок, по-видимому, граничит с зоной летальных дозовых нагрузок, на что указывает значительное снижение прироста растущих здесь деревьев в начальный период после Кыштымской аварии. Ширина участка составляет около 500 м. Для косвенной оценки уровня загрязнения почвы в месте отбора образцов, у каждого дерева с использованием блока детектирования БДПБ-01 (Атомтех, Беларусь) в трех точках проводили измерения плотности потока бета-частиц на уровне почвы. В качестве контрольной группы использовали деревья, растущие вблизи ВУРСа на участке с современным уровнем загрязнения почвы стронцием-90 около 39 кБк/м^2 . В условиях лаборатории с использованием стандартных методов дендрохронологии с точностью до 0.01 мм определяли ширину годичных колец древесины (Шиятов и др., 2001). Для устранения эффекта возраста дерева данные индексировали. Кроме этого, на сканированных изображениях с микропрепаратов анатомических срезов древесины определяли толщину клеточных стенок, площадь люмена (пространства клетки, ранее занятого цитоплазмой, ядром и вакуолями), а также размеры клеток.

Проведенный анализ показал наличие линейной связи между индексом ширины древесных колец, образованных в период с 1959 по 1966 годы и плотностью потока бета-

частиц в месте роста дерева. При этом на части исследованного участка, наиболее удаленного от оси ВУРСа, уровень прироста годичных колец древесины был сопоставим со значениями, отмеченными для деревьев контрольной группы. С одной стороны, это свидетельствует о возможности использования показателя ширины годичных колец древесины для индикации сильного аэрального радиоактивного загрязнения, с другой, на крайне узкий диапазон дозовых нагрузок, для которого подобная индикация возможна. Так ширина зоны ВУРСа между местом, в котором сохранились пережившие Кыштымскую аварию сосны и зоной регистрации «биологического эффекта» составляет не более 500 метров. Результаты дендроиндикации с использованием методов цифровой анатомии древесины будут представлены в докладе.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00467, <https://rscf.ru/project/23-27-00467/>.

Генетическое разнообразие грызунов в зоне ВУРС по данным анализа молекулярных маркеров

Е.Б. Григоркина¹, С.Б. Ракитин¹, Г.В. Оленев¹, О.В. Тарасов²

¹ ФГБУН «Институт экологии растений и животных» УрО РАН, Екатеринбург

² ФГУП «ПО «Маяк», Озерск, Челябинская область

grigorkina@ipae.uran.ru

Впервые в зоне влияния ВУРС проведены молекулярно-генетические исследования с использованием ядерного (микросателлиты) и митохондриального (фрагмент гена цитохрома *b* мтДНК) маркеров. Биоматериалы для анализа были получены в ходе мониторинговых исследований локальных популяций красных полевок (*Myodes rutilus* Pallas, 1779) из зоны ВУРС, прилегающей (9–10 км) и географически удаленной (220 км) фоновых территорий.

Выявлены общие тренды по обоим молекулярным маркерам. Установлены различия по параметрам генетического разнообразия у грызунов из зоны ВУРС, в костной ткани которых депонирован ⁹⁰Sr (реперный радионуклид), и удаленной референтной выборки, обитающей в условиях глобального радиоактивного загрязнения. Обнаружены более высокие показатели генетического разнообразия по ядерным (число уникальных аллелей, индекс аллельного разнообразия) и митохондриальным (нуклеотидное разнообразие, среднее число парных различий между гаплотипами) маркерам у животных на сопредельных зоне ВУРС (9–10 км) участках.

Предположение о взаимосвязи параметров генетического разнообразия с миграционными процессами между популяционными группировками грызунов из зоны ВУРС на сопредельные территории проверено в полевых экспериментах методом группового мечения животных родамином. Выявлены мигранты на прилежащем участке. Их принадлежность к зоне ВУРС подтверждена радиометрическим анализом костной ткани животных (⁹⁰Sr — пожизненный биомаркер). Дистанция эффективного (имеющего генетические последствия) расселения полевок составила 9,3–9,5 км.

Результаты проведенного исследования позволяют заключить, что дозовые нагрузки, получаемые мелкими млекопитающими в зоне ВУРС, могут быть причиной изменчивости ядерной и мтДНК; что эффективное (по Алтухову, 2003) расселение грызунов (т.е. дальние дисперсии, завершающиеся размножением) приводит к переносу радиационно-индуцированных эффектов на сопредельные территории. Это имеет определяющее значение для понимания природы генетического разнообразия популяций и их адаптивных возможностей.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИЭРиЖ УрО РАН (№ 122021000077–6).

Genetic diversity of rodents inhabiting EURT zone according to the analysis of molecular markers

E.B. Grigorkina ¹, S.B. Rakitin ¹, G.V. Olenev ¹, O.V. Tarasov ²

¹ Institute of Plant and Animal Ecology, the Urals Division of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia;

² FGUP «PO «Mayak», Ozersk, Russia
grigorkina@ipae.uran.ru

Molecular-genetic investigations by usage of both nuclear (microsatellites) and mitochondrial (gene cytochrome *b'*(*cytb*) fragment of mitochondrial DNA (mtDNA) DNA markers in the Eastern-Urals radioactive trace zone (EURT) were conducted firstly. Biomaterials for this analysis have been received during monitoring field researches of local red-backed voles (*Myodes rutilus* Pallas, 1779) populations from EURT zone, adjacent (9–10 km) and geographically removed (220 km) background territories.

The common trends for both molecular markers were revealed. Distinctions in the parameters of genetic diversity between rodents from the EURT zone (in skeleton of which the main radionuclide ⁹⁰Sr is deposited) and the remote reference population inhabiting in conditions of global radioactive pollution were established. An increase in some indices of genetic diversity in animals from contiguous sizes (9-10 km) to the EURT zone was found. It concerns of both markers: nuclear (the number of unique alleles and the allelic richness index) and mitochondrial (the nucleotide diversity and the average number of pair distinctions between haplotypes).

The assumption about interrelation of genetic diversity' parameters with migration processes between population groupings of rodents from the EURT zone on adjacent territories was checked up in field experiments by usage of animals' group marking with rhodamine B. Migrants on an adjacent site were revealed. Their accessory to EURT zone was confirmed by the radiometric analysis' data of animals bone tissue (⁹⁰Sr a long life biomarker). The effective distance (having genetic consequences) of voles dispersions has made 9.3–9.5 km.

Results of our investigations allow concluding that doze loads received by small mammals inhabiting EURT zone could be the reason of nuclear and mitochondrial DNA variability. Effective (Altukhov, 2003) migration of rodents (i.e. the distant dispersions which are coming to reproduction) promotes carrying over of radiation-induced effects on adjacent territories. Their mutational pool is expanded owing to gene flows from Eastern Urals reserve. Rodents' dispersions have defining value for understanding the nature of genetic variety of populations and their adaptive possibilities.

This study was performed within the frameworks of state contract with the Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch, Russian Academy of Sciences (№ 122021000077–6).

Радиобиологическая оценка воздействия на окружающую среду затопленных объектов в арктической зоне Российской Федерации

В.Г. Старинский, В.А. Серегин, Ю.В. Гущина, А.А. Филонова, Ю.Н. Павленко-Михайлов

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва
vitalstar90@mail.ru

Арктическая зона Российской Федерации имеет огромный экосистемный потенциал, включающий в себя как ресурсы, обеспечивающие национальные интересы страны, так и стратегически важные пути, которые обеспечивают грузопоток по Северному морскому коридору. В процессе активного взаимодействия человека с Арктической зоной на эту территорию оказывается все большее воздействие, которое повышает вероятность потенциальной угрозы для компонентов природной среды. Учитывая активное присутствие человека в Арктической зоне, а также увеличение грузооборота по Северному морскому пути, особое внимание направлено на оценку возможных радиобиологических эффектов у арктической фауны и флоры.

В Арктической зоне России существует ряд радиоэкологических проблем, требующих поэтапного решения, одной из которых является возможное радиоактивное загрязнение морской акватории, обусловленное поступлением радионуклидов в окружающую среду, вследствие деградации и нарушения целостности защитных барьеров затонувших атомных подводных лодок или затопленных объектов, содержащих отработавшее ядерное топливо и радиоактивные отходы. Незапланированный выброс или утечка радиоактивных веществ в бассейн Северного Ледовитого океана может привести к распространению техногенных радионуклидов в экосистемах Арктики.

Одним из видов оценки радиобиологического воздействия на окружающую среду Арктической зоны является проведение мониторинга радиационной обстановки, а именно анализ содержания техногенных радиоактивных веществ в объектах окружающей среды. Это позволит определить уровень возможного влияния затопленных объектов на экологическую обстановку на Крайнем Севере и проживающее на данной территории население. Данный вид контроля может гарантировать защищенность населения, проживающего в Арктической зоне, потенциально подверженного возможному радиационному воздействию, а также способствовать выработке оптимальных решений при возникновении внештатных ситуаций.

На протяжении 2020-2022 гг. нами были выполнены работы по радиационному обследованию прибрежной зоны, находящейся в непосредственной близости к затопленным объектам. На исследованных территориях (о. Кильдин, с. Териберка и п. Амдерма) был проведен радиационно-гигиенический мониторинг с отбором проб окружающей среды, включая донные отложения, морскую и наземную растительность, воду, почву и местные пищевые продукты.

В результате проведенных исследований показано, что содержание техногенных радионуклидов в окружающей наземной среде и прибрежной морской акватории соответствует данным многолетних наблюдений и находится на уровне глобальных выпадений. Установлено, что среднее значение мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения, полученное на территориях и за пределами населенных пунктов, не отличается от значений, характерных для всей обследованной территории.

На основе проведенных исследований оценена доза облучения населения с применением консервативного подхода. Доза внешнего облучения формируется преимущественно за счет источников природного облучения, вклад техногенной составляющей соответствует 0,7 % и коррелирует с дозой от глобальных выпадений.

Полученные результаты радиационно-гигиенического мониторинга окружающей среды исследуемых территорий систематизированы в базе данных, зарегистрированной как результат интеллектуальной деятельности.

Таким образом, по результатам работ получены «фоновые» показатели радиационно-гигиенической обстановки до начала работ по подъему затопленных объектов, что позволит в дальнейшем оценить последствия планируемых реабилитационных мероприятий в этом районе Арктической зоны и представить информационные материалы для заинтересованной общественности.

Радиобиологическое влияние на человека и окружающую среду объектов уранового наследия

Ю.С. Бельских, А.В. Титов, Д.В. Исаев, М.П. Семенова,
Т.А. Дороньева, Р.А. Старинская, А.А. Шитова

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва
yourbelk@yandex.ru

В 2015 г. были завершены работы по рекультивации территорий бывшего уранодобывающего предприятия — рудников № 1 и № 2 Лермонтовского производственного объединения «Алмаз» (ЛПО «Алмаз»). Однако последующие исследования радиационной обстановки показывают, что имеются локальные несоответствия проектным критериям рекультивации. В связи с этим, целью настоящего исследования явился анализ радиационной обстановки на территории в районе расположения объектов бывшего уранодобывающего предприятия ЛПО «Алмаз» и оценка возможного влияния на здоровье человека и окружающую среду.

Для измерения мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы гамма-излучения (МАЭД) использовался метод пешеходной гамма-съемки с помощью портативного спектрометрического комплекса МКС-АТ6101с. Для исследования удельной активности радионуклидов проводился отбор проб почвы и воды поверхностных водоёмов. Активность гамма-излучающих радионуклидов измерялась на стационарном гамма-спектрометре фирмы CANBERRA. Измерение активности ^{210}Po и ^{210}Pb проводилось на радиометрической установке УМФ-2000 после их радиохимического выделения. Для исследования форм радионуклидов в грунте применялся метод последовательной экстракции Ф.И. Павлоцкой.

Как показали проведенные исследования, после проведенной рекультивации на рудниках № 1 и № 2 всё ещё остаются локальные участки отвалов, на которых МАЭД превышает 0,5 мкЗв/ч, хотя площадь таких участков существенно снизилась. Также имеются участки, на которых МАЭД превышает 0,6 мкЗв/ч (до 0,9 мкЗв/ч), что не допускается в соответствии с принятыми в проекте рекультивации критериями.

Исследования форм нахождения радионуклидов в почве отвалов показали, что большая часть активности радионуклидов либо прочно связана в почве, либо находится в кислоторастворимой форме. Лишь 7-32 % (по активности) радионуклидов при определённых условиях могут мигрировать по профилю почвы и быть доступны для растений и смываться сточными водами.

На территории посёлка Быкогорка — местности постоянного проживания населения и используемой для выпаса коров и овец — значения МАЭД не превышают 0,2 мкЗв/ч. / При этом, штольня № 9 рудника № 2 находится в непосредственной близости от фермерского хозяйства. Хотя данная территория защищена от сточных вод с горы Бык защитной канавой, из устья штольни вытекают шахтные воды, впадающие в пруд, расположенный на территории хозяйства. На небольшом участке в районе ручья значения МАЭД находятся в диапазоне от 0,3 до 0,5 мкЗв/ч. На территории садового товарищества, находящегося в непосредственной близости к отвалам штольни № 32 рудника № 1, значения МАЭД не превышают 0,5 мкЗв/ч, а непосредственно на территории товарищества — не выше 0,3 мкЗв/ч.

Анализ содержания радионуклидов в пробах воды, показал, что в воде родников и ключей на горе Бештау превышает уровень вмешательства для питьевой воды в 2,5-7 раз. Несмотря на то, что эти источники не являются источниками постоянного водоснабжения населения, вода может использоваться во время пешеходных или туристических прогулок. Доза внутреннего облучения от потребления воды из родников и ключей на горе Бештау, при условии посещения территории 1 раз в неделю и потреблении 1 л воды при каждом посещении, не превысит 20 мкЗв в год.

Проведенное исследование позволяет заключить:

- радиационная обстановка на отдельных участках рекультивированных отвалов не удовлетворяет требованиям, установленным в проекте рекультивации;
- наличие участков с повышенными уровнями МАЭД непосредственно на территориях рудников № 1 и № 2 не оказывает значимого радиобиологического влияния на человека;
- на территориях постоянного проживания населения исследуемые радиационные параметры не отличаются от фоновых показателей, характерных для данной местности.

Трансгенерационные эффекты у подорожника большого из зоны Восточно-Уральского радиоактивного следа

Н.С. Шималина, Е.В. Антонова, В.Н. Позолотина

ФГБУН «Институт экологии растений и животных» УрО РАН, Екатеринбург
nadia_malina@mail.ru

Кыштымская авария привела к образованию в 1957 г. Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС). Популяции растений на этой территории подвергаются воздействию ионизирующего излучения (ИИ) более 60 поколений. ИИ может индуцировать образование активных форм кислорода и изменять активность антиоксидантных ферментов у растений. В ряде исследований показано, что последствия техногенного стресса наблюдаются не только у растений, произрастающих в неблагоприятных условиях, но и у их потомков после снятия стрессового воздействия. Цель работы — изучение изменений про- и антиоксидантного статуса в трех поколениях подорожника большого (*Plantago major* L.) после прекращения хронического низкодозового облучения.

Смесь семян подорожника большого F0-поколения собирали в природных популяциях *P. major*, длительное время произрастающего в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа (дозы для родительских растений на участках ВУРС-10 и ВУРС-5 составляли 73,1 и 157,1 мкГр/ч) и на фоновых территориях (среднефоновая дозовая нагрузка 0,1086 мкГр/ч). Семена F1-поколения были получены с растений F0-поколения, выращенных на экспериментальных участках с "чистым" выравненным агрофоном. Семена F2- и F3-поколений были собраны в последующие годы соответственно с растений F1- и F2-поколений, культивируемых на тех же экспериментальных участках. Зрелые семена очищали и хранили в холодильнике при температуре -4°C до проведения лабораторных экспериментов. Семена проращивали методом рулонной культуры на дистиллированной воде при температуре +24°C и 12-дневном фотопериоде в течение 21 суток. Полученные проростки без корней замораживали в жидком азоте и использовали для спектрофотометрического анализа содержания малонового диальдегида (МДА), активности супероксиддисмутазы (СОД) и содержания низкомолекулярных антиоксидантов (НМАО).

Анализ биохимических показателей F0-поколения показал, что в объединенной выборке ВУРСа по сравнению с объединенной фоновой выборкой были значимо повышено содержание МДА (U-тест, $p = 0,004$) и активности СОД ($p = 0,045$). В выборке ВУРС-10 F0-поколения также выявлено значимое повышение суммарного содержания НМАО относительно фона ($p = 0,017$). В F1-поколении в выборке ВУРС-5 (наибольший уровень радиационной нагрузки на родительские растения) сохранилось повышенное содержание МДА ($p = 0,004$) и активность СОД ($p = 0,006$). В F2-поколении, как и в предыдущем, в выборке ВУРС-5 было отмечено значимое повышение содержания МДА относительно объединенной фоновой выборки ($p = 0,004$). Наибольшая активность СОД в F2-поколении также сохранилась в выборке ВУРС-5, однако различия с фоном незначимы ($p = 0,058$). В F3-поколении сохранение эффекта наблюдалось только по содержанию МДА: в объединенной выборке ВУРСа отмечено значимое повышение показателя относительно объединенной фоновой выборки ($p = 0,038$). Содержание НМАО в выборках подорожника из зоны ВУРСа не отличалось от фонового уровня во всех последующих поколениях после снятия радиационного воздействия.

Таким образом, на примере *P. major* из зоны ВУРСа показано, что признаки окислительного стресса в популяциях растений, подвергшихся воздействию низкодозового облучения, могут сохраняться как минимум в трех последующих поколениях после прекращения радиационного воздействия.

Сбор семян в природных ценопопуляциях и получение первого поколения после снятия стресса проведены в рамках продолжающейся темы госзадания ИЭРиЖ УрО РАН (№ 122021000077-6), получение семян F2- и F3-поколений, проведение экспериментов по проращиванию семян и биохимический анализ проростков были поддержаны Российским научным фондом (грант № 21-74-00038).

Изменчивость радиобиологических эффектов у растений в условиях сочетанного действия разных факторов

Е.В. Антонова¹, В.Н. Позолотина¹, Н.С. Шималина¹, Э.М. Каримуллина²

¹ ФГБУН «Институт экологии растений и животных» УрО РАН, Екатеринбург

² Университет Калгари, Канада

selena@ipae.uran.ru

В природных экосистемах действие радиации на живые организмы сопряжено с комплексом сопутствующих факторов, приводящих к формированию синергических, антагонистических и аддитивных эффектов (Caplin, Willey, 2018; Geras'kin et al., 2017; Pozolotina, Antonova, 2017; Петин и др., 2012). Краткосрочные исследования не могут выявить многообразия адаптивных ответов растений на хроническое действие облучения. Поэтому ведущая роль принадлежит длительному мониторингу (Pozolotina, Antonova 2017; Антонова и др., 2014; 2022; Позолотина и др., 2023).

Многолетняя изменчивость качества семенного потомства 11 видов травянистых растений из зоны Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРСа) была оценена нами в ходе лабораторных экспериментов. В разные годы выживаемость проростков на стадии листообразования была выше, или ниже, или не отличалась от контрольных значений. Адаптивные ответы у разных видов проявлялись специфично. Так, импактные выборки лопуха в 71 % случаев и одуванчика (33 %) чаще всего обладали меньшей выживаемостью (Pozolotina, Antonova 2017; Антонова и др., 2015; Позолотина и др., 2023) по сравнению с фоновыми ценопопуляциями. У икотника, пустырника и звездчатки преобладали (25-38 %) индифферентные реакции или для них также была характерна меньшая выживаемость (Антонова, Позолотина, 2020; Позолотина и др., 2010; 2023). У дремы, клевера и горошка доминировали (31 – 40 %) нейтральные реакции или для импактных проростков была характерна высокая выживаемость (Антонова, Позолотина 2016; 2013; 2017; Позолотина и др., 2023). Для костреца и бодяка большинство реакций (43 – 50 %) было индифферентным (Антонова и др., 2014; Росяева, Антонова, 2012). У подорожника обнаружено равномерное распределение реакций между 6 классами (Shimalina et al., 2023; Позолотина и др., 2023).

Обобщение данных (Антонова и др., 2022; Позолотина и др., 2023) о межгодовой изменчивости показателей жизнеспособности, мутабельности и радиочувствительности семян растений в условиях хронического облучения свидетельствуют о том, что погодные факторы играют ключевую роль при формировании семенного потомства и могут модифицировать действие радиации (Antonova et al., 2016; Pozolotina, Antonova, 2017; Shimalina et al. 2023; Антонова, Позолотина, 2020; Антонова и др., 2013; 2014; Позолотина и др., 2010). Так, для одуванчика и дремы из зоны ВУРСа отмечены положительные зависимости между показателями жизнеспособности семенного потомства и температурами мая, июня и августа текущего сезона (Pozolotina, Antonova, 2017; Антонова и др., 2013). В импактных популяциях звездчатки обнаружена обратная зависимость качества семян от температуры в июне (Позолотина и др., 2010).

У одуванчика из зоны ВУРСа за 14 лет наблюдений отмечен эффект гормезиса в год с наиболее благоприятным температурным режимом и экстремальное снижение выживаемости в год с низкими температурами и избыточными осадками. При этом в фоновых популяциях показатели не выходили за пределы нормы реакции (Pozolotina, Antonova, 2017). В тоже время в хронически облучаемых выборках костреца значимого влияния погодных условий на качество семенного потомства не было обнаружено, что обусловлено высокой межгодовой изменчивостью признаков, в 2–3 раза превышающей фоновый уровень (Антонова и др., 2014).

Для пустырника из зоны ВУРСа показано значимое влияние условий предыдущего (осенне-зимнего) сезона на качество семян текущего года (Антонова, Позолотина, 2020). Кроме того, фоновые и импактные популяции пустырника демонстрировали разный по силе отклик на действие осадков и температуры (гидротермический коэффициент за апрель).

Так, значения коэффициентов b_0 уравнений линейной регрессии по выживаемости (фоновые выборки) и длине корней (импактные выборки) были сопоставимы, а значения b_1 импактных выборок в 4,6 раза превышали фоновые. Аналогичные данные были получены по влиянию схожих, но не идентичных факторов: отношения суммы осадков при эффективных температурах за прошлую и текущую вегетацию к эффективным температурам за текущие летние месяцы (Ref_{10-7}/Tef_{6-7} ; Ref_{10-6}/Tef_{5-8}) на частоту аномалий у проростков. Следовательно, влияние погодно-климатических факторов для пустырника из зоны ВУРСа было сильнее, чем в фоновых выборках. Вероятно, в результате взаимодействия радиации и погодных условий возникают синергические эффекты и выборки становятся более чувствительными к изменениям окружающей среды (Pozolotina, Antonova, 2017; Антонова, Позолотина, 2020).

Чувствительность хронически облучаемых популяций пустырника к другим экологическим факторам была также подтверждена в экспериментах с промышленными наночастицами (Karimullina et al. 2015). Выявлено стимулирующее действие ZnO и TiO₂ на всхожесть семян пустырника из зоны ВУРСа. В тоже время Al₂O₃, Ag, ZnO оказывали токсическое действие на выживаемость проростков, а Al₂O₃, TiO₂ увеличивали частоту аномалий в развитии у проростков импактных выборок.

Таким образом, в условиях сочетанного действия разных экологических факторов показана бóльшая чувствительность растений, произрастающих в условиях хронического облучения в малых дозах, к изменению погодных условий и техногенным факторам.

Обобщение данных проведено в рамках государственного задания ИЭРиЖ УрО РАН (122021000077-6).

Особенности адаптации рыб, обитающих в радиационно-загрязненной среде, к экологическим факторам

Г.А. Тряпицына^{1,2}, А.А. Перетыкин¹, С.В. Тряпицына^{1,3}, Е.А. Пряхин¹

¹ ФГБУН «Уральский научно-практический центр радиационной медицины» ФМБА России,
Челябинск

² ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический
университет», естественно-технологический факультет, Челябинск

³ ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет», кафедра радиационной
биологии, Челябинск
tga28@mail.ru

Целью данной работы являлось изучение одновременного действия двух факторов (хронического радиационного воздействия и паразитарной инвазии) на состояние эритропоэза у плотвы (*Rutilus rutilus* L., 1758), окуня (*Perca fluviatilis* L., 1758) и щуки (*Esox lucius* L., 1758), обитающих в радиоактивно-загрязненной реке Тече.

Экосистема реки Течи (Челябинская обл., Россия) подверглась радиоактивному загрязнению в результате регламентных и аварийных сбросов жидких радиоактивных отходов (ЖРО) в 1949-1956 гг. предприятием атомной промышленности ПО «Маяк». Настоящее исследование выполнено через более чем 60 лет после начала сбросов ЖРО.

На реке Тече были организованы 3 станции отбора проб. Станция РТ1 располагалась в верховье реки (в 5 км ниже плотины П-11, замыкающей Теченский каскад водохранилищ ЖРО); станция РТ2 — на среднем участке реки, в 81 км ниже плотины П-11 вблизи населенного пункта Бродокалмак; станция РТ3 в нижней части реки в 184 км ниже плотины П-11, вблизи населенного пункта Першинское. В качестве водотока сравнения использовали реку Миасс (станция РМ). Химический состав воды на исследуемых станциях рек Теча был близким, за исключением содержания радионуклидов.

Лов рыбы проводили электроудочкой SAMUS 725MP (Польша) весной во время нереста (апрель) и летом во время нагула (август). Определяли мощность дозы облучения рыб. Определяли количество клеток в периферической крови у рыб (гемоцитометр «Пикоскель ПС-4М», «НПФ Лабовэй», Россия). В мазках цельной крови (окрашивали по Романовскому-Гимза) определяли количество эритроцитов, эритроидных клеток разной степени зрелости; наличие трипаносом.

В летних уловах суммарная доля зараженных трипаносомами рыб (40 %) была более высокой, чем весной (20 %) при анализе всех видов рыб. Самый высокий уровень паразитарной инвазии был у окуня (45 %), затем в порядке убывания следовала щука (23 %) и самый низкий уровень инвазии был у плотвы (14 %). Средние надфоновые мощности доз для рыб реки Течи для окуня плотвы и щуки составили: на станции РТ1 — 124 мкГр/сут, 108 мкГр/сут, 150 мкГр/сут; на станции РТ2 — 11 мкГр/сут, 16 мкГр/сут, 9 мкГр/сут; на станции РТ3 — 4 мкГр/сут, 9 мкГр/сут, 3 мкГр/сут соответственно.

У рыб из водотока сравнения (РМ), зараженных трипаносомами, количество эритроцитов в периферической крови значимо не отличалось от показателя у здоровых рыб этой же реки. У здоровых и больных трипаносомозом рыб реки Течи на станциях РТ2 и РТ3 показатели количества эритроцитов в крови значимо не отличались от показателя контроля (РМ). У здоровых и больных рыб радиоактивно загрязненной реки Течи на станции РТ1 численность эритроцитов в крови была статистически значимо ниже, чем у здоровых и у больных рыб в реке Миасс.

У здоровых рыб на всех станциях р. Течи статистически значимо увеличено процентное содержание эритробластов, прононормоцитов и в целом бластных клеток (эритробласты + прононормоциты) в крови по отношению к рыбам из р. Миасс. У больных рыб из р. Течи

статистически значимое увеличение процентного содержания эритробластов и нормоцитов по отношению к контролю регистрируется только на станции РТ1.

При действии радиации на рыб наибольшие потери продукции в эритропозе наблюдаются среди клеток с высоким уровнем пролиферации (65 %), потери среди более дифференцированных клеток составляют не более 10 % по отношению к контролю. Токсины трипаносомами не обладают избирательным действием — наблюдается примерно одинаковый по отношению к контролю уровень потерь (около 20 %) клеток крови различной степени зрелости.

В условиях хронического радиационного воздействия на рыб в диапазоне мощностей доз облучения 3-150 мкГр/сут сочетанное действие радиации и трипаносомной инвазии характеризуется антагонистическим взаимодействием на продуктивность бластных клеток и аддитивным взаимодействием на продукцию более дифференцированных (нормоциты) клеток и количество зрелых эритроцитов.

При оценке действия радиационного фактора на гемопоэз необходимо учитывать фактор инвазии рыб трипаносомами: сочетанное действие трипаносомной инвазии и радиации может приводить к модификации эффектов в делящихся пулах кроветворения.

Наследственная эпигенетическая радиоадаптация грызунов на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа

В.И. Стариченко, Н.М. Любашевский

ФГБУН «Институт экологии растений и животных» УрО РАН, Екатеринбург
starichenko@ipae.uran.ru

Радиоадаптацию грызунов, обитающих на радиоактивно загрязненных территориях, исследуют десятки лет, но вопрос ее существования до сих пор остаётся спорным. Так, в работе (Møller, Mousseau, 2016) не найдено убедительных примеров адаптации; в позднем обзоре (Mousseau, 2021), подчёркнуто, что для решения этого важнейшего вопроса еще недостаточно материалов. Этому мнению противоречит наблюдаемое успешное выживание грызунов ВУРСа при большой «исторической» (суммарной) дозовой нагрузке. Эта доза вызывает высокую мутагенность в ряду более сотни поколений, но с сохранением видовой структуры, воспроизводства и численности и с достоверной перспективой полной реабилитации при нормализации радиационного фона. Такая судьба рассматриваемого отряда млекопитающих, типичная для крупных радиационных аварий, невозможна без комплекса адаптивных модификаций. Тест по увеличению выживаемости при летальной лучевой нагрузке представляется надежным дополнительным критерием (Ильенко, 1974, 1994; Fesenko, 2019). Напротив, в тесте с облучением на адаптивный ответ именно отрицательная реакция (обычная на ВУРСе и в Чернобыле) указывает, что механизмы адаптации уже задействованы. Нередкий положительный ответ у заведомо неадаптированных, в том числе у интактных особей на фоновых территориях, лишь важный признак готовности к облучению. Это следует из работ (Rodgers, Baker, 2000, 2010), из натуральных наблюдений и результатов тестовых облучений.

Многолетние наблюдения на ВУРСе показали наличие определённой степени изоляции импактных популяций грызунов. Выраженность патологических и реактивных процессов здесь соответствует хронической дозовой нагрузке от радионуклидного загрязнения территории, круто снижающегося от осевой линии ВУРСа к его периферии. В значительной степени это проявление сниженной мобильности: миграционный обмен в среднем ниже 10 % (Стариченко и др., 2014), обновление популяций замедленно, согласно (Shishkina et al., 2021), период полуобновления — в среднем 8 лет. Такие признаки изоляции указывают на функциональную активацию её как фактора эволюции, способствующего популяционной наследственной адаптации.

Адекватность защитной адаптивной реакции в условиях радиотоксичной нагрузки и роль видовых особенностей организма стала очевидной, когда была описана колония обыкновенной слепушонки (*Ellobius talpinus* Pallas, 1770), обитающей в эпицентре ВУРСа (Любашевский и др., 2002; Любашевский, Стариченко, 2010). У её особей при предельной для ВУРСа хронической дозе 2 Гр/год (до 12 Гр в течение жизни) не были обнаружены достоверные патологические нарушения, в том числе цитогенетические, характерные для других грызунов при существенно меньших дозах (фоновая радиорезистентность слепушонки — одна из самых низких среди них). Эти исследования послужили основанием для оценки степени радиоадаптации слепушонки как *совершенной*, в противоположность *несовершенной адаптации* тех видов, которые наряду с высокой жизнеспособностью несут явные и нередко множественные признаки морфофизиологической и репродуктивной патологии. Полагаем, что эти признаки в ряду поколений потеряли исходное патологическое значение и закрепились в новой норме реакции. В то же время и у особей, обитающих в менее загрязненных зонах, отмечаются многие признаки физиологической адаптации, акклиматизации, гормезиса.

Однако известно, что попытки воспроизвести радиоадаптацию в эксперименте не удаются (Шведов, Аклеев, 2001). Возможно, это следствие недоучёта особенностей облучения в радиационных катастрофах и индуцируемых таким облучением эпигенетических преобразований у грызунов, которые на ВУРСе были описаны в работах (Васильева и др., 2002; Васильев и др., 2003) и дополнены позже (Васильев, 2005; Любашевский и др., 2009;

Любашевский, Стариченко, 2018). Эпигенетические преобразования способны всесторонне влиять на жизнедеятельность грызунов (Jablonka, 2013; Belli, Tabocchini, 2020), включая существенные модификации процессов метаболизма как базового механизма радиоадаптации. Пример – эпигенетическая детерминация аккумуляции ^{90}Sr , которая следует из значимой величины внутрисемейной корреляции его аккумуляции у обыкновенной слепушонки, обитающей семьями на территории ВУРСа (Стариченко, 2011). Экспериментальное подтверждение показано на линейных мышах в отношении ^{90}Sr и остеотропного стабильного фтора на фоне отсутствия межлинейных различий накопления этих веществ (Стариченко, 2010, 2018).

Работа выполнена в рамках государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН (№122921000077-6).

Комплексное эколого-гигиеническое обследование территории расположения объектов ядерного наследия в санитарно-защитной зоне АО «АЭХК»

Ю.Н. Зозуль, В.В. Шлыгин, С.В. Ахромеев, Т.И. Гимадова, С.М. Киселёв

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва
julnik@list.ru

Ангарский электролизный химический комбинат (АО «АЭХК») активно проводит работы по выводу из эксплуатации объектов ядерного наследия. Часть таких объектов, где размещены отходы сублиматного производства, расположены в санитарно-защитной зоне АО «АЭХК». В 2012 году прекращено размещение шламов, содержащих РАО, в наземные шламоотстойники (сооружения 311), часть которых засыпаны и рекультивированы. С 2021 года осуществляется вывод из эксплуатации подземных пунктов хранения твердых радиоактивных отходов (сооружения 310). Комплексное эколого-гигиеническое обследование территории санитарно-защитной зоны АО «АЭХК» позволяет оценить состояние загрязнения объектов окружающей среды и выявить приоритетные загрязнители, в том числе нерадиационной природы.

Комплексное эколого-гигиеническое обследование территории санитарно-защитной зоны АО «АЭХК», проведенное в период 2021-2022 гг., включало оценку радиационной обстановки, а также исследование содержания радионуклидов и токсичных металлов в объектах окружающей среды.

Мощность амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) в районе размещения хранилищ отходов сублиматного производства соответствует среднему региональному уровню по Иркутской области (0,14 мкЗв/ч), изменяясь от 0,10 до 0,20 мкЗв/ч. Что подтверждают результаты интегральной оценки годовой дозы внешнего облучения с использованием термомюноминесцентных дозиметров, размещенных в пределах санитарно-защитной зоны и непосредственно по периметру сооружений 310 (медианное значение составило 0,8 мЗв, максимальное 1,5 мЗв).

В пробах поверхностного слоя удельная активность природных (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U) и техногенных (^{137}Cs , ^{90}Sr) радионуклидов характеризуется фоновыми значениями. В районе водоемов-шламоотстойников отмечено присутствие фторидов в водорастворимой форме на уровне ПДК (максимальное — 2 ПДК).

Не выявлено превышения установленных НРБ-99/2009 уровней вмешательства в пробах воды наблюдательных скважин в районе размещения хранилищ. Медианное значение суммарной удельной альфа-активности составило 0,03 Бк/кг, в отдельных скважинах у законсервированных водоемов-шламоотстойников поднималось до 0,2 Бк/кг. Содержание фторидов в скважинах в районе сооружений 311 находится на уровне 2 ПДК для воды объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (максимальное — 250 ПДК). В воде скважин у рекультивированных шламоотстойников присутствует мышьяк на уровне 3 ПДК (максимальное — 13 ПДК).

Исследование проб донных отложений водоемов-шламоотстойников выявило присутствие техногенных радионуклидов ^{137}Cs и ^{241}Am с удельной активностью выше критерия неограниченного использования (^{137}Cs — 1,2 А_{ни}, ^{241}Am — 5 А_{ни}). В пробах осветленной пульпы водоемов-шламоотстойников содержание урана достигает 100 ПДК, также в содержаниях, превышающих ПДК, присутствует ряд токсичных металлов 1 класса опасности (талий, ртуть, мышьяк, бериллий).

Комплексное эколого-гигиеническое обследование и анализ ситуации на площадке проведения работ по выводу из эксплуатации сооружений 310 в период 2021-2022 гг. не выявило ухудшения радиационной обстановки. Однако выявленное повышенное содержание фторидов и присутствие токсичных металлов в воде наблюдательных скважин в районе размещения шламоотстойников свидетельствует о наличии миграции загрязнения в подземные воды. Поэтому необходимо проводить мониторинг с определением элементов-загрязнителей в воде наблюдательных скважин в районе размещения шламоотстойников, а также детально исследовать миграцию токсичных металлов.

Комплексный подход к мониторингу среды обитания и состояния здоровья населения на территориях расположения объектов ядерного наследия

С.М. Киселёв, Н.К. Шандала, А.М. Лягинская, Ю.Н. Зозуль

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва
sm_kiselev@mail.ru

Проблемы ядерного наследия многогранны и наряду с экономическими и правовыми аспектами обращения с накопленными отходами включают в себя существенную социальную составляющую, связанную с обеспокоенностью населения, проживающего в районах расположения этих объектов. Научно-практическую основу надзорной деятельности в области обеспечения безопасности населения и окружающей среды при решении вопросов снижения объемов накопленного ядерного наследия и реабилитации загрязненных территорий в России составляют комплексные междисциплинарные (медицина, гигиена, экология) исследования. А основной информационной составляющей являются мониторинговые исследования, направленные на изучение динамики изменений в окружающей среде и влияния на состояние здоровья населения. Основываясь на накопленном опыте, нами предложен современный эколого-гигиенический подход и развита методология реализации мониторинговых исследований на его основе на территориях расположения радиационно-опасных объектов.

Основным инструментарием настоящего подхода является система наблюдения, оценки и прогноза состояния среды обитания человека и здоровья населения. Методология реализации комплексного эколого-гигиенического мониторинга (далее — КЭГМ), апробированная на территориях расположения объектов ядерного наследия и предприятий ядерно-топливного цикла, включает три уровня организации и базируется на интегральном подходе к оценке воздействия на окружающую среду и здоровья населения, проживающего в районах расположения радиационно-опасных предприятий.

Первый уровень КЭГМ заключается в исследовании приоритетных загрязнителей и определении пространственно-временных особенностей их распределения в окружающей среде. Накопленный опыт в этой области реализован в создании единой информационно-аналитической платформы на базе накопленных данных о состоянии загрязнения окружающей среды с визуализацией результатов исследования эколого-гигиенической обстановки.

Второй уровень организации КЭГМ предусматривает исследование изменений качества окружающей среды в результате комплексного воздействия загрязнителей различной природы, определяющих значимые природные и антропогенные нагрузки. Эти изменения оцениваются методами биологического мониторинга на основе применения биологических тест-объектов, которые выступают в роли сенсоров, выявляющих интегральный биологический эффект комплекса воздействующих факторов внешней среды.

Третий уровень КЭГМ ориентирован на исследование ответа человеческого организма на комплексное воздействие факторов внешней среды, оценку и прогнозирование состояния его здоровья. На индивидуальном и групповом уровне в составе производственных коллективов и групп населения апробирован персонализированный подход для оценки риска неблагоприятных последствий на здоровье человека в условиях комплексного воздействия факторов внешней среды на основе оценки цитогенетического статуса. Впервые разработаны методические подходы к оценке состояния здоровья населения, расширяющие рекомендации социально-гигиенического мониторинга с учетом особенностей местоположения территорий ядерного наследия и социальной среды малых по численности городов России. На их основе разработаны технологии мониторинга состояния здоровья, апробированные как на больших производственных коллективах и группах населения, так и на индивидуальном уровне.

Предложенный подход базируется на разработанном комплексе методических документов, определяющем организацию и порядок его реализации. Развитие аналитической составляющей его реализации предполагает формирование единой информационно-

аналитической платформы на базе накопленных данных о состоянии загрязнения окружающей среды с визуализацией результатов исследования эколого-гигиенической обстановки.

Индикаторы миграции урана в подземные воды в районе расположения шламохранилищ АО «АЭХК»

В.В. Шлыгин, С.М. Киселёв, Ю.Н. Зозуль, С.В. Ахромеев

ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва
vladvas83@mail.ru

Совершенствование регулирующего надзора за состоянием загрязнения окружающей среды и безопасности населения в районах расположения объектов ядерного наследия диктует необходимость оптимизации мониторинговых исследований эколого-гигиенической обстановки для оперативного слежения за сложившейся обстановкой и принятия своевременных решений. Целью настоящего исследования является анализ комплексного загрязнения подземных вод в районе расположения шламохранилищ АО «АЭХК» и поиск индикаторных соединений состояния водной среды, определяющих миграцию урана из хранилищ РАО в окружающую среду. Актуальность данных исследований определяется тем фактом, что эти объекты располагаются на природоохранных территориях оз. Байкал и локализованы в городской черте г. Ангарск.

Для изучения мобильности урана в качестве исследуемых параметров состояния подземных вод использовали показатели кислотности среды (рН), содержание нитрат- и нитрит-анионов, формирующих окислительно-восстановительный потенциал подземных вод, а также концентрацию фторид-анионов, являющихся характерным загрязнителем в районе расположения шламохранилищ. Выбор данных показателей основан на результатах ранее проведенных исследований по изучению особенностей миграции урана в подземных водах в сложившихся условиях хранения отходов сублиматного производства.

Источником данных по загрязнению подземных вод являлись результаты собственных исследований, проведенных в 2021-2022 гг. в районе расположения шламохранилищ I-VI очередей, а также материалы, предоставленные экологической лабораторией АО «АЭХК» за аналогичные периоды времени. Методическим инструментарием поиска взаимосвязи служил корреляционно-регрессионный анализ. Коэффициенты регрессии и корреляции рассчитаны на основании общепринятого метода наименьших квадратов, достоверность коэффициентов корреляции и границы их доверительных интервалов были определены посредством z-преобразования Фишера. Модели зависимостей были построены на основании априорных знаний о взаимодействии влияющих факторов и концепции упрощения интерпретации модели.

Известно, что подвижность соединений урана в природных водах определяется окислительно-восстановительным и кислотно-основным потенциалами среды. Установлена прямая связь массовой концентрации урана с соотношением $\frac{NO_2^-}{NO_3^-}$, которая описывается уравнением линейной регрессии (формула 1):

$$U = 0,0218 \cdot \frac{NO_2^-}{NO_3^-} + 0,00101 \quad (1)$$

Коэффициент линейной корреляции в этом случае составил 0,79 (высокая степень корреляции по шкале Чеддока), а его достоверность доказана при уровне значимости 95 % — границы его доверительного интервала от 0,25 до 0,96. Включение в уравнение водородного показателя рН с учётом эффекта взаимодействия факторов привело к весьма незначительному повышению коэффициента корреляции до уровня 0,82 (границы доверительного интервала при $P = 0,95$ от 0,15 до 0,97).

Уравнение зависимости массовой концентрации урана от фторид-анионов имеет вид (формула 2):

$$U = (7,67 \cdot F^- + 22,2) \cdot 10^{-5} \quad (2)$$

Коэффициент корреляции оценен на уровне 0,60 (заметная корреляция по шкале Чеддока), границы доверительного интервала при $P=0,95$ от 0,16 до 0,84. Обнаруженные корреляционные связи между содержанием урана, окислительно-восстановительным потенциалом и фторид-анионами в подземных водах требуют дальнейших исследований на большем объеме экспериментальных исследований.

Результаты проведенных исследований подтверждают тот факт, что накопленные илы шламоохранилищ взаимодействуют с природными водами и данная ситуация требует активного наблюдения миграции урана и других загрязнителей в подземные воды, в том числе с применением исследованных в работе индикаторов.

Характеристика зообентоса специальных промышленных водоемов ПО «Маяк»

А.А. Перетыкин

ФГБУН «Уральский научно-практический центр радиационной медицины» ФМБА России,
Челябинск
engineer_eo@mail.ru

Одной из фундаментальных проблем, стоящих перед современной экологической наукой, является проблема определения пределов устойчивости экологических систем к антропогенной нагрузке. В связи с этим особый интерес для изучения представляют экосистемы, существующие в условиях экстремального техногенного воздействия. Такой уникальной экологической системой представляется Теченский каскад водоемов — специальные промышленные площадки, образованные для обеспечения производственной деятельности ПО «Маяк».

Изучение донных животных в радиоактивно-загрязненных водных экосистемах является важной с точки зрения экологии. Зообентосные сообщества Теченского каскада водоемов ранее, до 2016 г. не изучались. Зообентос является удобным и информативным объектом для биологического и экологического мониторинга экосистем, это объясняется его относительной стабильностью во времени и способностью к ретроспективному представлению изменений в экосистеме.

Объектом исследования являлись радиоактивно-загрязненные водоемы ПО «Маяк»: водоемы Теченского каскада В-3, В-4, В-10, В-11, а также водоемы В-17.

Отбор проб зообентоса осуществляли в мае-июне 2016 г. Исследуемые образцы отбирали с помощью ковшового дночерпателя с площадью захвата 0,25 м². При отборе пробы отмывали от донных отложений в воде водоема, раскладывали по полиэтиленовым ведрам и фиксировали 95 % этиловым спиртом.

Таксономическое разнообразие зообентоса водоема В-11 было невелико, и он был представлен в основном хирономидами и брюхоногими моллюсками. Плотность и биомасса зообентоса также в основном определялась этими двумя группами. Абсолютное большинство зообентоса водоема В-10 и по численности, и по биомассе составили малощетинковые черви и хирономиды, в прибрежном участке также высокой была численность нематод. Плотность и биомасса зообентоса в прибрежных участках оказалась в 2,5-5 раз выше, чем в относительно глубоководной зоне по старому руслу р. Теча. Зообентос водоема В-4 состоял в основном из хирономид и олигохет, которые не достигали большого обилия, за исключением центральной, относительно глубоководной части водоема. Брюхоногие моллюски, присутствовавшие в пробах, были представлены фитофильными видами, которые проводят всю жизнь на водной растительности и не связаны непосредственно с дном водоема.

Донное население водоема В-3 состояло в основном из хирономид. Брюхоногие моллюски здесь, как и в водоеме В-4, были представлены видами, вся жизнедеятельность которых тесно связана с водными растениями, а не непосредственно с поверхностью дна.

Зообентос водоема В-17 состоял только из хирономид, которые достигали здесь высокой численности и значительной биомассы, причем по численности доминировали мелкие танитарзины *Tanytarsus* гр. *gregarius*, по биомассе — крупные таниподины *Psectrotanypus sibiricus*.

Таким образом, анализ состава зообентоса исследованных водоемов позволяет проследить изменение состава донных сообществ. Наиболее заметные изменения касаются группы пелофильных моллюсков. Заметное снижение плотности и биомассы мелких моллюсков отмечалось с водоема В-10. Мелкие двустворчатые моллюски семейств *Euglesidae* и *Pisidiidae*, у которых весь цикл размножения проходит на дне (яйцеживородящие), практически полностью отсутствовали в водоемах В-10, В-4 и В-3. Мелкие брюхоногие моллюски, обитающие на грунте, представители семейств *Bithyniidae* и *Valvatidae*, обычные

для водоемов разного типа умеренной зоны, в массе присутствовали только в водоеме В-11. В водоемах В-10, В-4 и В-3 они полностью отсутствовали. В то же время брюхоногие моллюски, обитающие на растениях, в том числе мелкие виды катушек, были обнаружены во всех водоемах ТКВ. Присутствие крупных двустворчатых моллюсков — беззубок в водоемах В-10, В-4, объясняется тем, что их личиночные стадии (глохидии) проходят в водной толще — они паразитируют на рыбах. Полученные результаты позволили предположить, что критической группой организмов при радиоактивном загрязнении водных экосистем являются моллюски, обитающие на грунте в течение всего жизненного цикла.

Ликвидация «объекта ядерного наследия», организация и проведение радиационного мониторинга персонала и окружающей среды

А.И. Мамин, Ю.М. Поволоцкий, В.Ю. Поротова, С.А. Романов

ФГБУН «Южно-Уральский институт биофизики» ФМБА России,
Озерск, Челябинская область
subi@subi.su

Цель. Повышение уровня радиационной безопасности населения, снятие социальной напряженности в городе Озерске от радиационно-опасного объекта — здание 2К.

Задачи:

1. Демонтаж технологического оборудования, загрязненного радиоактивными веществами в здании 2К;
2. Вывоз твердых радиоактивных отходов на временное хранение на ФГУП «ПО «Маяк»;
3. Рекультивация территории, на которой находилось здание 2К;
4. Постоянный радиационный мониторинг персонала и окружающей среды.

Актуальность. В связи с тем, что здание 2К находилось на территории ЮУрИБФ в селитебной зоне г. Озерска с высокими уровнями загрязнения оборудования и поверхностей здания 2К, организация ликвидации «объекта ядерного наследия» должна была проводиться с особыми осторожностями, с применением таких методов и средств дезактивации, локализации, сорбции или десорбции радиоактивных веществ, которые позволили бы предупредить малейшее загрязнение персонала и окружающей среды.

Результат. Проводимый в течение выполнения всех работ радиационный контроль персонала и радиационный мониторинг в районе здания 2К показал, что внутреннее поступление радионуклидов в организм персонала и миграция радиоактивных веществ из здания 2К отсутствовали.

ISBN 978-5-00218-774-4



**Актуальные вопросы радиационной безопасности:
Сб. материалов юбилейной научной-практической конференции
«Актуальные вопросы радиационной безопасности»,
посвященной 70-летию Южно-уральского института биофизики**

Издательство «Перо»

109052, Москва, Нижегородская ул., д. 29-33, стр. 15, ком. 536

Тел.: (495) 973-72-28, 665-34-36

Подписано к использованию 18.10.2023.

Объем Мбайт. Электрон. текстовые дан. Заказ 957.