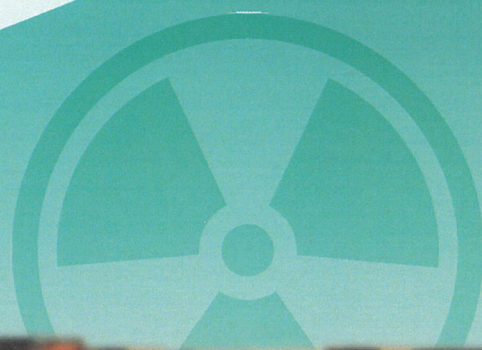
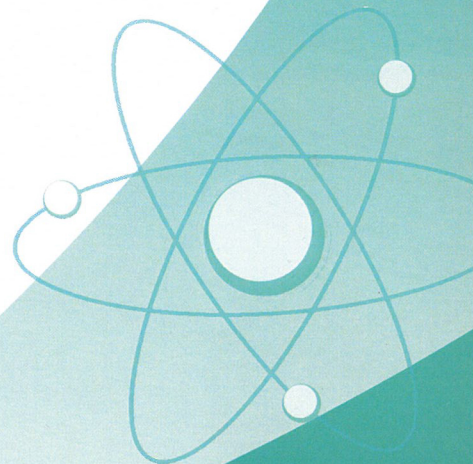


**Ядерная медицина
и радиационная
безопасность**

международный конгресс

МЕЖДУНАРОДНЫЙ КОНГРЕСС ЯДЕРНАЯ МЕДИЦИНА И РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ



НАУКА



БЕЗОПАСНОСТЬ



ЗДОРОВЬЕ

МОСКВА, 2026

Федеральное медико-биологическое агентство
Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Государственный научный центр Российской Федерации –
Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна

Сборник статей
Международного конгресса
«Ядерная медицина
и радиационная безопасность»

24 сентября 2026 г.

Москва
2026

УДК 614.876:615.849(062)
ББК 53.6я43 + 55.691я43
С-232

Сборник статей Международного конгресса «Ядерная медицина и радиационная безопасность», посвященного 80-летию ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России (24 сентября 2026 г., г. Москва). – Москва: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2026. – 160 с.

Составитель: Сандецкая Н.В. – заведующий библиотекой научно-технической информации ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России.

В сборник материалов вошли тезисы участников Международного конгресса «Ядерная медицина и радиационная безопасность». Это научное мероприятие, проводимое для ознакомления профильных специалистов с перспективами и новейшими достижениями в области ядерной физики, радиохимии, разработки радиофармацевтических препаратов, а также обеспечения радиационной безопасности при использовании ионизирующего излучения в медицине и промышленности. Конгресс служит ключевой площадкой для интеграции фундаментальных научных разработок в клиническую практику и обсуждения стратегий развития отечественной радиологической службы.

Организаторами международного конгресса «Ядерная медицина и радиационная безопасность» являются:

- Федеральное медико-биологическое агентство;
- ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России.

Содержание

РАЗДЕЛ № 1. «РАДИАЦИОННЫЕ НАУКИ И ЯДЕРНАЯ МЕДИЦИНА»

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА РАДИОФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО ПРЕПАРАТА «ЦЕРЕБРОТЕХ.99mTc» <i>Е. А. Лямцева, А.О. Малышева, А. А. Ларенков</i>	6
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ХИМИОЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ <i>И.Н. Шейно, П.В. Ижевский, Д.А. Гиневский, И.А. Конобеев</i>	10
ОКАЗАНИЕ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ МЕТОДАМИ МЕДИЦИНСКОЙ РАДИОЛОГИИ В СИСТЕМЕ ФМБА РОССИИ <i>Ю.Д., Удалов Е.А Васильева., А.А. Ларенков, С.В. Горнов</i>	15
ТРЁХЦВЕТНОЕ FISH-ОКРАШИВАНИЕ ХРОМОСОМ И РЕТРОСПЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА ДОЗЫ <i>В.Ю. Нугис, В.А. Никитина, М.Г. Козлова, Е.Е. Ломоносова</i>	21
АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ МОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ <i>Ю.В. Грабский, Д.Ю. Рогованов, С.В. Натха, Д.В. Арефьева</i>	26
МЕТОДИКА ЭКСТРАКЦИОННО-ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО ВЫДЕЛЕНИЯ АКТИНОИДОВ ИЗ ПРОБ БИОСУБСТРАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭКСТРАКЦИОННЫХ СМОЛ UTEVA И TRU <i>Е.Ю. Максимова, Н.П. Поцяпун, С.Н. Павлова, О.С. Баженова</i>	33
ОЦЕНКА И УПРАВЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫМИ РИСКАМИ КАК НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ <i>А.Ф. Бобров, Н. Л. Проскурякова</i>	38
ТЕХНОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ОЦЕНКИ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЧЕЛОВЕКА И ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ В УСЛОВИЯХ СОЧЕТАННОГО ДЕЙСТВИЯ ЭКОТОКСИКАНТОВ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ <i>С.М. Киселёв, Н.К. Шандала, Ю.Н. Зозуль, Л.П. Сычева</i>	42
РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАКАЧКИ ЖИДКИХ СРЕД, СОДЕРЖАЩИХ ТРИТИЙ, В ГЛУБИННЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ФОРМАЦИИ <i>В.Г. Барчуков, А.А. Максимов, О.А. Кочетков, Д.И. Кабанов</i>	47
РАДИАЦИОННАЯ ПАТОЛОГИЯ ПОДЖЕЛУДОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ОСТРОМ АКЦИДЕНТАЛЬНОМ ОБЛУЧЕНИИ <i>Ю.Е. Квачева, Т.В. Пафимова, М.П. Семенова, В.А. Сухов</i>	51
УЧЁТ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ, ОТРАСЛЕВЫЕ ПОДХОДЫ, МЕСТО И РОЛЬ В ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЕ <i>Я.В. Пител, Н.Л. Проскурякова</i>	

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕДИКО-САНИТАРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В СЛУЧАЕ
РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЙ НА ОБЪЕКТАХ И ТЕРРИТОРИЯХ, ОБСЛУЖИВАЕМЫХ
ФМБА РОССИИ

<i>М.И. Грачев, Ю.А. Саленко, Г.П. Фролов, В.В. Барчуков</i>	61
ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА АКТИВНОСТИ ИНКОРПОРИРОВАННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ ПРИ РАНЕВОМ ПОСТУПЛЕНИИ	
<i>П.П. Ганцовский, А.Ю. Комаров, Е.А. Корнева</i>	67
СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЛЕЧЕНИИ МЕСТНЫХ ЛУЧЕВЫХ ПОРАЖЕНИЙ: ОПЫТ ФГБУ ГНЦ ФМБЦ ИМ. А.И. БУРНАЗЯНА ФМБА РОССИИ	
<i>Т.А. Астрелина, В.А. Брунчуков, Ю.Б. Сучкова, В.А. Никитина, О.Г. Михадаркина</i>	70
ГИГИЕНИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ И МЕХАНИЗМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛА НА ОБЪЕКТАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ	
<i>А.Е. Колышкин</i>	75
КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ В ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАЦИОНАРНОЙ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ЭНДОВАСКУЛЯРНЫХ ХИРУРГОВ	
<i>В.А. Сухов, А. Лантук, Д.В. Щербаков, М.С. Мотин</i>	81
ТЕХНОЛОГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ НОВЫХ ВИДОВ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА	
<i>О.В. Паринов, Е.Г. Метляев, А.М. Лягинская, П.В. Максимова</i>	85
РАДИАЦИОННАЯ КОММУНАЛЬНАЯ ГИГИЕНА – НАУКА О РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ	
<i>Н.К. Шандала, Ю.Е. Квачева, В.А. Серегин, А.А. Филонова</i>	92
PERSONS IN UTERO EXPOSED BY THE CHERNOBYL ACCIDENT: DIFFERENCES AND ASSOCIATIONS BETWEEN IQ LEVELS, RADIATION DOSE, AND THYROID HORMONE	
<i>Sergey Igumnov</i>	97
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИАЦИОННОЙ БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЫ	
<i>И.Б. Ушаков</i>	99

**РАЗДЕЛ № 2. «ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ
В ЗДРАВООХРАНЕНИИ»106**

ОЦЕНКА РАННИХ ЛУЧЕВЫХ РЕАКЦИЙ ПРИ АДЪЮВАНТНОЙ БРАХИТЕРАПИИ РАКА МАТКИ

<i>А.А. Завьялов, Ю.Д. Удалов, Л.Р. Хайретдинова, Н.Ф. Артикбаева</i>	106
---	-----

ПОСТТРАВМАТИЧЕСКОЕ СТРЕССОВОЕ РАССТРОЙСТВО У НАСЕЛЕНИЯ ПРИ УГРОЗАХ
БЕСПИЛОТНЫХ И РАКЕТНЫХ ОПАСНОСТЯХ В УСЛОВИЯХ СВО

<i>С.В. Горнов, А.А. Зинченко, Ю.Н. Гут</i>	112
---	-----

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ (VR) В ДИАГНОСТИКЕ И ТЕРАПИИ ПОСТТРАВМАТИЧЕСКОГО СТРЕССОВОГО РАССТРОЙСТВА: НЕЙРОПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ КОРРЕЛЯТЫ

С.В. Чернышенко, Ю.Н. Гут, С.В. Горнов..... 118

ПРИМЕНЕНИЕ DEERONET ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ПУЧКОВ ПРОТОНОВ

Г.А. Крусанов, А.В. Белоусов, М.А. Колыванова, А.В. Гордеев, Ю.Е. Смирнов 123

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ МЕТАБОЛИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ПАЦИЕНТОВ С ОСТРЫМИ ЛЕЙКОЗАМИ

Б.И. Юргин, В.В. Кореньков, А.В. Жигалова 126

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОЙ СТЕПЕНИ ДЕТАЛИЗАЦИИ ЦИФРОВОЙ ДОЗИМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРАБЕКУЛЯРНОЙ КОСТИ

Р.М. Ахмадуллин, П.А. Шарagin, Е.А. Шишкина, Е.И. Толстых 132

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МРТ С КОНТРАСТИРОВАНИЕМ ГАДОЛИНИЕМ И СЦИНТИГРАФИИ МИОКАРДА В ВЫЯВЛЕНИИ ПОСТКОВИДНОГО МИОКАРДИТА

И.А. Дуванов, М.А. Афанасьева, Е.А. Овчинникова 140

НАРУШЕНИЯ РИТМА И ПРОВОДИМОСТИ У ПАЦИЕНТОВ С ПОСТКОВИДНЫМ МИОКАРДИТОМ: СВЯЗЬ С ДАННЫМИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И АНТИКАРДИАЛЬНЫМИ АНТИТЕЛАМИ

Е.А. Овчинникова, И.А. Дуванов, М.А. Афанасьева 144

ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ АНТИКАРДИАЛЬНЫХ АУТОАНТИТЕЛ У ПАЦИЕНТОВ С КОРОНАВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИЕЙ

И.А. Дуванов, М.А. Афанасьева, Е.А. Овчинникова 148

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ В ОФТАЛЬМОЛОГИИ

Н.В. Корсакова, В.А. Капцов, О.Ю. Алексеева 153

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ОБЕСПЕЧЕНИИ КАЧЕСТВА ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ: ПИЛОТНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Ж.Ж. Смирнова, Д.Ю. Бобров, А.В. Белоусов, Г.А. Крусанов, М.А. Колыванова 157

РАЗДЕЛ № 1. «РАДИАЦИОННЫЕ НАУКИ И ЯДЕРНАЯ МЕДИЦИНА»

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА РАДИОФАРМАЦЕВТИЧЕСКОГО ПРЕПАРАТА «ЦЕРЕБРОТЕХ.99mTc»

Е. А. Лямцева, А.О. Малышева, А. А. Ларенков
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России, Москва,
[lena1746364.91@mail.ru](mailto:lana1746364.91@mail.ru)

Актуальность. Специфической чертой радионуклидов, применяемых в ядерной медицине, является то, что они используются в конъюгированном виде в составе комплексного лекарственного средства. Это позволяет осуществлять адресную доставку радионуклидов. Технеций-99m является наиболее часто используемым радионуклидом в рутинных процедурах визуализации в ядерной медицине. Изучение возможности мечення технецием-99m различных специфичных комплексообразующих соединений для изучения центральной нервной системы потенциально полезно для оценки функции мозга в норме и при нейродегенеративных заболеваниях. К нейродегенеративным заболеваниям относятся болезнь Паркинсона, болезнь Альцгеймера, болезнь Хантингтона, боковой амиотрофический склероз, рассеянный склероз, множественная системная атрофия, таупатии и прионные заболевания [1]. В результате проведенных исследований разработан новый радиофармацевтический лекарственный препарат с технецием-99m и тропантиолом для ранней диагностики болезни Паркинсона и других двигательных расстройств, а также мониторинга эффективности глубокой стимуляции мозга.

Цель. Для регистрации и экспертизы разрабатываемых лекарственных средств необходимо создать нормативный документ по качеству, который включает спецификацию на лиофилизат и препарат с нормативными показателями качества, описание методов определения содержания основных компонентов, входящих в состав

лиофилизата, определение подлинности, растворимости, прозрачности и цветности раствора лиофилизата, количества видимых и невидимых механических включений, однородности дозирования, потери в массе при высушивании, бактериальных эндотоксинов, стерильности. Для радиофармацевтического лекарственного препарата указаны значения pH, объемной активности и радиохимической чистоты. В спецификации также указан вид упаковки, маркировки, условия транспортирования лиофилизата, условия хранения и сроки годности лиофилизата и препарата.

Материалы и методы. Раствор натрия пертехнетата, ^{99m}Tc (элюат) получали элюированием генератора $^{99}\text{Mo}/^{99m}\text{Tc}$ (АО «НИФХИ имени Л.Я.Карпова, г. Обнинск, Россия) 0,9% раствором NaCl для инъекций, входящим в комплект поставки генератора. Активность ^{99m}Tc измеряли на дозкалибраторе ISOMED-2010 («MED Nuklear-Medizintechnik Dresden GmbH», Германия). Радиометрическим методом путем сканирования хроматограмм со скоростью 1 мм/с на приборе Scan-RAM («LabLogic Systems Limited», Великобритания) определяли распределение радиоактивности по хроматограмме. В работе использовали коммерчески доступные химические реактивы и растворители $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_6$, $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{C}_6\text{H}_{14}\text{O}_6$, $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, HCl, NaOH («Sigma-Aldrich»). Используемые реактивы взвешивали на весах ME 204 («Mettler Toledo», Швейцария). Измерение pH растворов проводили с помощью pH-метр S20 «Seven Easy» («Mettler Toledo», Швейцария). Спектрофотометрическое измерение оптической плотности при определении содержания тропантиола и олова хлорида в лиофилизатах проводили на спектрофотометре Helios Omega (США).

Результаты. Для определения содержания основного вещества в лиофилизате тропантиола разработана методика, основанная на спектрофотометрическом методе с использованием предварительной экстракции хлороформом. Количественное определение тропантиола основано на том, что в результате взаимодействия тропантиола с бромтимоловым синим в кислой среде образуется окрашенный ионный комплекс, который экстрагируется хлороформом. Образование окрашенного продукта реакции происходит в количестве, пропорциональном количеству тропантиола. Оптическая плотность полученного экстракта, измеренная спектрофотометрическим методом при длине волны 414 нм, линейно

зависит от концентрации тропантиола. Разработанная методика позволяет определять содержание тропантиола в лиофилизате при относительной погрешности методики 6,4 %, предела повторяемости 8,0 % и предела воспроизводимости 11,1 % при доверительной вероятности 0,95.

Для определения содержания двухвалентного олова в лиофилизате разработана методика, основанная на образовании окрашенного комплекса с максимумом поглощения при 353 нм. В результате реакции двухвалентного олова с калием рениевокислым и калием роданистым, образование окрашенного комплекса происходит в количестве, пропорциональном количеству олова дихлорида дигидрата. Разработанная методика позволяет определять количество олова дихлорида дигидрата в лиофилизате при относительной погрешности методики 3,5 %, предела повторяемости 7,5 % и предела воспроизводимости 6,1 % при доверительной вероятности 0,95.

Основным показателем качества любого радиофармацевтического препарата, в том числе и изготовленного с использованием натрия пертехнетата, ^{99m}Tc , является радиохимическая чистота (РХЧ), которая определяет в клинике требуемую фармакокинетику препарата, достоверность получаемой информации и диагностическую эффективность, а также безопасность соответствующей медицинской процедуры (то есть отсутствие нежелательного накопления радионуклида в интактных органах, что связано с необоснованными лучевыми нагрузками). Для определения РХЧ методом ТСХ была разработана хроматографическая система на пластинках с тонким слоем оксида алюминия на пластиковой подложке в смеси растворителей (тетрагидрофуран : 3,85 % раствора ацетата аммония : метанол : ацетонитрил при объемном соотношении 1:4:3:4).

Предлагаемая хроматографическая система позволяет разделить и определить содержание следующих соединений: невосстановленный пертехнетат натрия и другие гидрофильные примеси, которые подвигаются с фронтом растворителя и имеют $R_f = 0,95 \pm 0,05$, гидролизованные формы восстановленного технеция- 99m и примеси разложившихся комплексов технеция- 99m в виде TcO_3^+ в координации с N_2S_2 - группами остаются на старте и имеют $R_f = 0 \pm 0,05$, комплекс технеция- 99m с тропантиолом продвигается с $R_f = 0,7 \pm 0,05$. Значение РХЧ

радиофармацевтического препарата «Церебротех,99mTc» составляет более 90 %.

На *рис. 1* представлены хроматограммы элюата технеция-99m (А), и препарата, содержащая комплекс тропантиола с технецием-99m (Б).

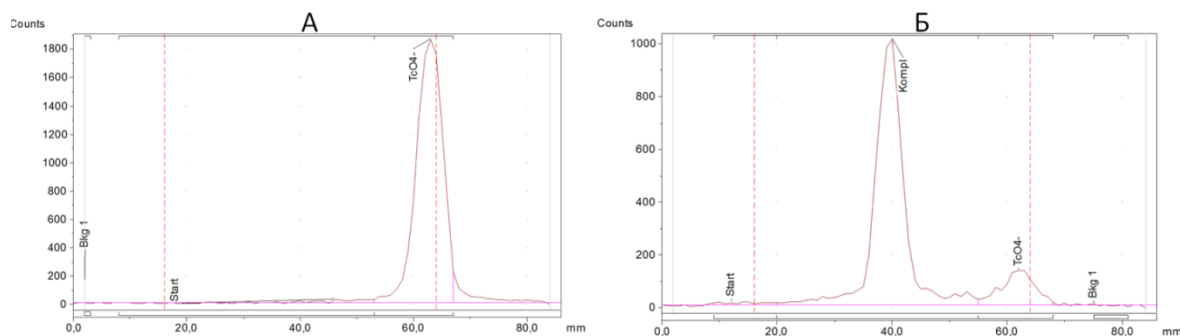


Рисунок 1 Хроматограммы элюата технеция-99m (А) и препарата содержащего комплекс тропантиола с технецием-99m (Б)

Выводы. Разработан проект нормативного документа по качеству, содержащий методики и значения нормативных показателей для анализа радиофармацевтического лекарственного препарата, применяемого для ОФЭКТ-диагностики нейродегенеративных заболеваний. Проект нормативного документа по качеству на лиофилизат и изготовленный из него радиофармацевтический лекарственный препарат «Церебротех,99mTc» был разработан в соответствии с требованиями решения Коллегии Евразийской экономической комиссии от 07 сентября 2018 г № 151 «Руководство по составлению нормативного документа по качеству лекарственного препарата» (в редакции от 04 октября 2022 г. № 137).

Список литературы:

1. Piccini P. P. Dopamine Transporter: Basic Aspects and Neuroimaging. Movement Disorders. 2003;18:S3–S8. DOI:10.1002/mds.10571.

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания ФМБА России (номер государственного учета НИР 124032100024-3).

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ХИМИОЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

И.Н. Шейно, П.В. Ижевский, Д.А. Гиневский, И.А. Конобеев
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, г. Москва,
izhevski@rambler.ru

Актуальность. Традиционный принцип лечения злокачественных новообразований основан на принципе «местное радикальное лечение (хирургическое или лучевое) и системное вмешательство (химиотерапия)», незаменим в сдерживании опухоли и увеличении продолжительности жизни пациентов. Поиск баланса между терапевтической эффективностью и минимизацией токсического воздействия требует новых методик лечения.

Математическое моделирование способствует пониманию механизмов резистентности и влияния факторов микроокружения, разнообразных характеристик опухолей, включая закономерности роста, ангиогенеза, межклеточных взаимодействий и эффектов лечения.

Причиной резистентности опухоли считается фенотипическая клеточная пластичность, которая позволяет раковым клеткам адаптироваться к терапевтическому воздействию. Это позволяет изначально чувствительным клеткам приобретать резистентность к терапевтическим агентам [5].

При персонализации лечения и решении проблем неэффективности ХЛТ математическое моделирование может количественно характеризовать и предсказывать взаимосвязи между фармакокинетикой препарата, эффектами его действия и прогрессированием заболевания, что является обоснованием принятия решений о схеме лечения. В отличие от используемой в клинической практике качественной оценки результатов лечения по критериям типа «отрицательная или положительная динамика», математическое моделирование позволяет получить количественную оценку эффективности и сравнимые результаты новых методов лечения [2,3].

Разработка новых подходов к оценке эффективности различных режимов ХЛТ является актуальной научно-практической задачей.

Цель: Разработка технологической цепочки математических моделей для поиска оптимальных режимов химиолучевой терапии. Материалы и методы. Материалом исследования послужили данные литературы о физико-химических процессах распределения платины после введения «Цисплатина» в опухолевых и нормальных клетках на лучевое воздействие.

Методы исследования - математическое моделирование (in silico) процессов химиотерапевтического и лучевого воздействия на опухоль препаратами платины. Описан состав, назначение, последовательность и взаимосвязь математических моделей реализующих алгоритм расчетной оценки радиобиологических эффектов комбинированной ХЛТ, необходимых для определения оптимальных режимов терапии препаратами платины.

Результаты. В процессе разработки математических моделей ХЛТ препаратами платины определены основные параметры процессов происходящих после поступления в клетки атома – модификатора лучевого воздействия на опухоль. Расчетный фреймворк, определяющий последовательность и структуру математических моделей количественной оценки радиобиологических эффектов, должен соответствовать схеме на *рисунке 1*.

Исходными данными для расчета являются представленный в единой шкале времени график введения препарата и облучения пациента. Рассматриваемый при моделировании диапазон времени должен соответствовать клинической практике ХЛТ (от 6 до 10 недель).

Результат моделирования - функция, описывающая динамику числа клеток первичной опухоли в период лечения. На основе полученной зависимости рассчитываются функционалы, определяющие количественные эффекты лучевой терапии.

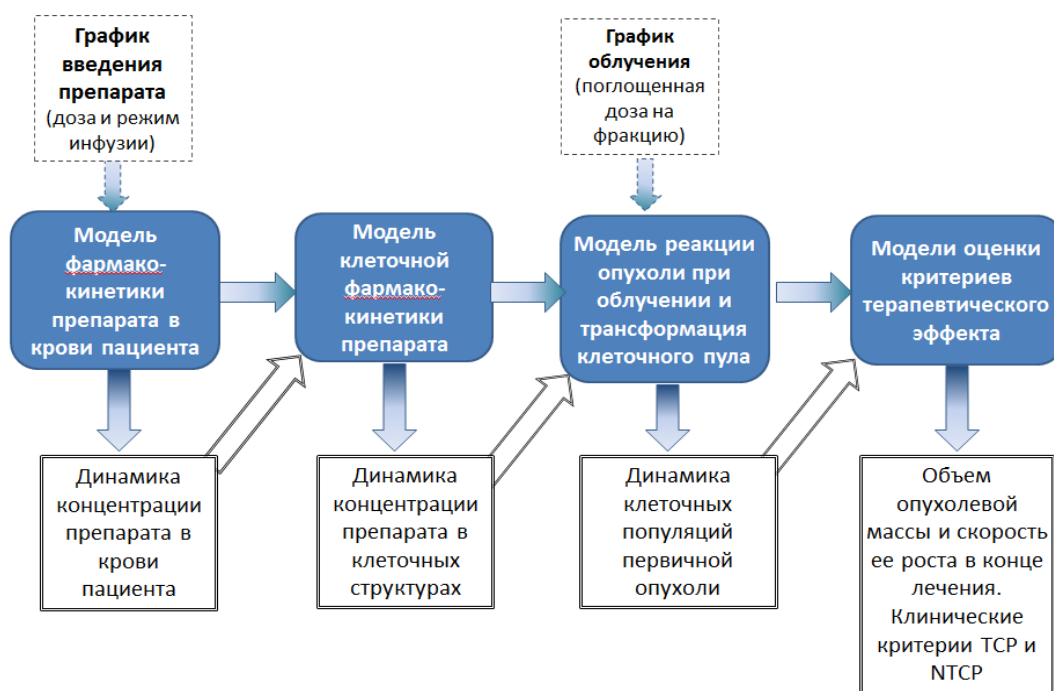


Рисунок 1. Технологическая цепочка математических моделей – определяющая структуру и последовательность методов количественных оценок радиобиологических эффектов при ХЛТ

Особенности отдельных моделей следующие.

Модель динамики препарата в кровеносных сосудах. Целью модели является расчет концентрации цисплатина в кровеносных сосудах в области локализации опухоли. Исходные данные - масса введенного препарата и длительность инфузии, произведенные в определенные временные точки в рассматриваемом диапазоне времени.

При разработке модели использовано компартментное представление фармакокинетики. Результатом расчета является функция, определяющая динамику концентрации платины в крови в любых заданных временных точках на протяжении курса лечения.

Модель клеточной фармакокинетики препарата. Подробное описание модели приведено в [1]. Результатом расчета являются функции определяющие динамику концентрации платины в клеточных структурах на протяжении курса терапии. Исходя из расчетов, можно определить «терапевтическое окно» наибольшей эффективности ХЛТ – период, когда концентрация платины в клетках опухоли превышает концентрацию в окружающих тканях. В этот период облучение позволяет нанести «тройной удар» по клеткам опухоли:

- химиотерапевтическим воздействием атомов платины,
- внешним ионизирующим излучением,

- действием «вторичного излучения» возникающего на атомах платины во время сеанса лучевой терапии.

Модель реакции клеточного пула опухоли на облучение в присутствии препарата. Цель - количественная оценка размера и состава пула клеток опухоли в любой момент времени в период лечения.

Динамика гетерогенности клеток внутри опухоли является основным фактором, определяющим устойчивость к лечению при ХЛТ. Модель должна учитывать индукцию резистентности [5]. При реализации схемы должна быть применена модель многотипного ветвящегося процесса для описания различных пулов клеток опухолей, претерпевающих фенотипическое переключение. Подход абстрагирует процесс деления клеток до «событий ветвления», позволяя каждой клетке генерировать потомков по любому подтипу для описания эволюционной динамики популяций опухолевых клеток, и может быть реализован стохастическими методами.

Для учёта влияния препарата на поведение клеток при химическом воздействии использовано уравнение Хилла – биохимическая модель зависимости «доза-реакция». Для учета радиационного воздействия использована LQ-модель с измененными параметрами чувствительности α и β , рассчитанным для ХЛТ.

Исходными данными для расчета являются значения соотношения чувствительной и радиорезистентной фракции в опухоли. Оптимальный режим лечения должен обеспечить в конце курса лечения минимальный объем или/и минимальную скорость роста опухоли. Поиск оптимального режима проводится многовариантными расчетами различных графиков лечения или методами динамического программирования.

Выводы. Описан состав, назначение, последовательность и взаимосвязь математических моделей реализующих алгоритм расчетной оценки эффектов комбинированного радиационно-химического воздействия на опухоль, необходимых для определения оптимальных режимов химиолучевой терапии с препаратами платины. Реализация алгоритма позволит увеличить эффективность и снизить побочные эффекты. В частности, возможно определение терапевтического окна наибольшей эффективности проведения химиолучевой терапии. Алгоритм может послужить основой для разработки новых клинических рекомендаций в части преодоления

резистентности к препаратам платины и оптимизации результатов. Методология проведения расчетов является универсальной для различных комбинаций технологий ХЛТ, в том числе радиоизотопной и нейтрон-захватной терапии.

Список литературы:

1. Гиневский А.Ф., Гиневский Д.А., Ижевский П.В. Моделирование пространственно-временного распределения лекарственного агента в биологической ткани. Матем. моделирование. 2021; т. 33, №11, стр. 3–17 doi: <https://doi.org/10.20948/mm-2021-11-01>.

2. Gunnarsson E.B., Magnússon B.V., Foo J. Optimal dosing of anti-cancer treatment under drug-induced plasticity. NPJ Syst Biol Appl. 2025; 11(1): 98. doi: 10.1038/s41540-025-00571-5. PMID: 40850942; PMCID: PMC12375710.

3. Fischer M., Blüthgen N. On minimising tumoural growth under treatment resistance. J.Theor.Biol. 2024 Feb 21; 579: 111716. doi: 10.1016/j.jtbi.2023.111716. Epub 2023 Dec 20. PMID: 38135033.

4. He J., Qiu Z., Fan J., Xie X., Sheng Q., Sui X. Drug tolerant persister cell plasticity in cancer: a revolutionary strategy for more effective anticancer therapies. Sig Transduct Target Ther. 2024 Aug 14; 9(1): 209. doi: 10.1038/s41392-024-01891-4. PMID: 39138145; PMCID: PMC11322379.

5. Zheng D., Preuss K., Milano M.T., He X., Gou L., Shi Yu, et al. Mathematical modeling in radiotherapy for cancer: a comprehensive narrative review. Radiat Oncol. 2025 Apr 4; 20: 49. doi:10.1186/s13014-025-02626-7.

ОКАЗАНИЕ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ МЕТОДАМИ МЕДИЦИНСКОЙ РАДИОЛОГИИ В СИСТЕМЕ ФМБА РОССИИ

*Ю.Д., Удалов Е.А. Васильева, А.А. Ларенков, С.В. Горнов
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва
evasilyeva@fmbcfmba.ru*

Введение. Медицинская радиология представляет собой один из наиболее динамично развивающихся и высокотехнологичных векторов современного здравоохранения, так как относится к одному из основных методов диагностики и лечения онкологических заболеваний, причем в большинстве случаев наиболее щадящими, неинвазивными и самыми дешевыми, по сравнению с хирургией и лекарственными методами лечения (химиотерапией, иммунотерапией) [1]. В системе ФМБА России основа для развития методов медицинской радиологии была заложена еще во времена СССР, когда на Институт биофизики Минздрава СССР были возложены функции, связанные с изучением воздействия радиации на человека и безопасным применением радиоактивных источников в медицине и народном хозяйстве [2]. В настоящее время ФМБА России обладает уникальной для Российской Федерации экосистемой, объединяющей фундаментальные научные институты, передовые центры радиохимического синтеза и сеть мощных клинических хабов федерального уровня. Это стало возможно благодаря заложенной ранее основе, а также открытию в 2014-2021 годах региональных центров ядерной медицины [3, 4], федерального центра радиологии и онкологии [5] и дооснащению учреждений новейшим оборудованием [6].

Цель. Проанализировать эффективность функционирования имеющейся в настоящее время в системе ФМБА России структуры по оказанию высокотехнологичной медицинской помощи методами медицинской радиологии.

Материалы и методы. Анализ данных, представленных учреждениями ФМБА России, по количеству случаев применения в

2025 году методов радионуклидной диагностики (РНД), радионуклидной терапии (РНТ) и лучевой терапии.

Результаты. В структуре Федерального медико-биологического агентства сформирована уникальная научно-клиническая база, обеспечивающая оказание высокотехнологичной медицинской помощи методами медицинской радиологии. На сегодняшний день профильная медицинская помощь осуществляется на базе ведущих федеральных центров, среди которых: ФГБУ ФНКЦРиО ФМБА России, ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, ФГБУ ФЦМН ФМБА России, ФГБУ ФСНКЦ ФМБА России, ФГБУЗ СМКЦ им. Н.А. Семашко ФМБА России, ФГБУ СЗОНКЦ им. Л.Г. Соколова ФМБА России, ФБУЗ ПОМЦ ФМБА России.

Структура финансового обеспечения профильной медицинской помощи носит диверсифицированный характер и реализуется за счет средств федерального бюджета (в рамках квот на высокотехнологичную медицинскую помощь (ВМП)), фондов обязательного медицинского страхования (ОМС) и внебюджетных источников. Текущие объемы клинической работы по итогам 2025 года (Таблицы 1, 2 и 3) демонстрируют высокую востребованность радиологических методов диагностики и лечения, а также сложившуюся маршрутизацию пациентов внутри сети ФМБА России.

Представленная в *таблице 1* информация по перечню учреждений и количеству услуг, оказанных методами РНД в 2025 году, показывает, что в структуре ФМБА России потребность в данном виде исследований успешно закрывалась в Центральном, Северо-Западном и Сибирском федеральных округах. При этом подавляющая доля исследований — 73,0 % (12 668 ед.) — выполнялась за счет средств ОМС. Это подтверждает важнейшую социальную роль учреждений ФМБА России в обеспечении массового скрининга и точного стадирования социально значимых заболеваний.

Таблица 1 – Объёмы оказания медицинской помощи методами радионуклидной диагностики

Учреждение	ОМС (кол-во услуг)	Другие источники* (кол-во услуг)	Итого
ФГБУ ФНКЦРиО ФМБА России	5959	2566	8525
ФГБУ «ФЦМН» ФМБА России	1752	1325	3077

ФГБУ ФСНКЦ ФМБА России	2270	59	2329
ФГБУЗ СМКЦ им. Н.А. Семашко ФМБА России	2644	561	3205
ФГБУ СЗОНКЦ им. Л.Г. Соколова ФМБА России	43	162	205
ВСЕГО по ФМБА России:	12668	4673	17341

* - бюджет (ВМП) и внебюджет

В Центральном федеральном округе это позволили сделать такие учреждения, как ФГБУ ФНКЦРиО ФМБА России и ФГБУ «ФЦМН» ФМБА России. Причем на данный федеральный округ приходилось 66,9 % от общего количества оказанных услуг в 2025 году. Основная часть из них – 73,4 % проводилась в ФГБУ ФНКЦРиО ФМБА России – центре федерального уровня.

При этом стоит обратить внимание, что в ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, также находящемся в указанном федеральном округе в 2025 году, исследования не проводились, что было обусловлено ремонтом отделения радионуклидной диагностики и монтажом новой системы ОФЭКТ/КТ, запуск которой запланирован в 2026 году. Таким образом, можно ожидать увеличение объемов исследований в дальнейшем.

Региональный центр на базе ФГБУЗ СМКЦ им. Н.А. Семашко ФМБА России, а также ФГБУ СЗОНКЦ им. Л.Г. Соколова ФМБА России закрывали потребность в РНД в Северо-Западном федеральном округе. На их долю приходилось 19,7 % из всех исследований РНД, проведенных в системе ФМБА России в 2025 году и большая часть из них – 94% проводилась в ФГБУЗ СМКЦ им. Н.А. Семашко ФМБА России.

Потребности Сибирского федерального округа в массовой диагностике успешно закрывались мощностями регионального центра на базе ФГБУ ФСНКЦ ФМБА России, здесь в 2025 году проведено 13,4 % от общего количества исследований.

Общий объем терапевтических вмешательств в 2025 году составил 2989 процедур (таблица 2). Потребность в проведении РНТ в федеральных округах закрывались центрами федерального и регионального значения, так в Центральном - ФГБУ ФНКЦРиО ФМБА России, в Северо-Западном - ФГБУЗ СМКЦ им. Н.А. Семашко ФМБА России, в Сибирском - ФГБУ ФСНКЦ ФМБА России. При этом большая нагрузка приходилась на ФГБУ ФНКЦРиО ФМБА России, в

котором в 2025 году проведено 56,0 % от всего количества услуг по оказанию медицинской помощи методами РНТ.

Таблица 2 – Объёмы оказания медицинской помощи методами радионуклидной терапии

Учреждение	ОМС (кол-во услуг)	Другие источники* (кол-во услуг)	Итого
ФГБУ ФНКЦРиО ФМБА России	438	1237	1675
ФГБУ ФСНКЦ ФМБА России	895	15	910
ФГБУЗ СМКЦ им. Н.А. Семашко ФМБА России	218	186	404
ВСЕГО по ФМБА России:	1551	1438	2989

* - бюджет (ВМП) и внебюджет

Данные по оказанию медицинской помощи методами лучевой терапии представлены в таблице 3, стоит отметить, что в системе ФМБА России в 2025 году в основном применялись следующие методы лучевой терапии: протонная, фотонная (включая радиохимию), брахитерапия внутритканевая и внутрисполостная.

Таблица 3 – Объёмы оказания медицинской помощи методами лучевой терапии

Учреждение	ВМП (кол-во услуг)	ОМС (кол-во услуг)	Внебюджет (кол-во услуг)	Итого
ФГБУ ФНКЦРиО ФМБА России	964	307	106	1377
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России	0	512	245	757
ФГБУ ФСНКЦ ФМБА России	60	0	0	60
ФГБУ СЗОНКЦ им. Л.Г. Соколова ФМБА России	204	0	0	204
ФБУЗ ПОМЦ ФМБА России	20	0	2	22
ВСЕГО по ФМБА России:	1248	819	353	2420

Общее количество, проведенных данными методами лечения сеансов, составляет 2420. Финансовое обеспечение применения методов лучевой терапии имеет ярко выраженную бюджетную направленность: 85,4 % (2067 ед.) процедур оплачивалась за счет средств федерального бюджета. Данная пропорция объективно

отражает высокую себестоимость и сложность протоколов лечения, основная финансовая нагрузка по которым ложится на государство.

Потребности в оказании услуг методами лучевой терапии были реализованы в Центральном федеральном округе - ФГБУ ФНКЦРиО ФМБА России и ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, в Северо-Западном - ФГБУ СЗОНКЦ им. Л.Г. Соколова ФМБА России, в Сибирском - ФГБУ ФСНКЦ ФМБА России, в Приволжском - ФБУЗ ПОМЦ ФМБА России.

Абсолютным лидером по объемам проведения данных услуг в 2025 году являлся ФГБУ ФНКЦРиО ФМБА России, концентрирующий наиболее тяжелые категории пациентов. На его долю приходилось 56,9 % от всех оказанных услуг в системе ФМБА России.

Здесь также стоит обратить внимание на то, что 81,2 % от всех сеансов применения методов лучевой терапии приходилось на Центральный федеральный округ, которые успешно выполнялись силами ФГБУ ФНКЦРиО ФМБА России и ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России. В Северо-Западном федеральном округе ФГБУ СЗОНКЦ им. Л.Г. Соколова ФМБА России проведено 8,4 % услуг от общего количества. Региональный центр, работающий на базе ФГБУ ФСНКЦ ФМБА России, закрывал потребности Сибирского федерального округа, здесь выполнено 2,5 % сеансов от общего количества. Потребность Приволжского федерального округа - ФБУЗ ПОМЦ ФМБА России, которым проведено около 1% от всех услуг, оказанных в структуре ФМБА России.

Заключение. Проведенный анализ представленных данных по использованию методов РНД, РНТ и лучевой терапии подтверждает их высокую востребованность, а также целесообразность их применения при оказании медицинской помощи по профилю «Медицинская радиология».

Вместе с этим обращает на себя внимание, высокая концентрация учреждений в Центральном федеральном округе и, соответственно, доминирующее количество услуг, оказанное ими и в диагностике, и в лечении, что, с одной стороны, можно объяснить высокой концентрацией контингента, обслуживаемого ФМБА России, в данном федеральном округе.

При этом в ФБУЗ ПОМЦ ФМБА России (Приволжский федеральный округ) услуг РНД и РНТ не проводилось, но в

настоящее время в учреждении формируется инфраструктура для их проведения.

В целом для сохранения позиций и увеличения объемов ВМП методами «Медицинской радиологии» требуется системная реализация мероприятий по обновлению парка тяжелого диагностического оборудования и локализации производства инновационных радиофармацевтических препаратов на собственных площадках. Сохранение лидирующих позиций ФМБА России и реализация заложенного потенциала ядерной медицины требуют перехода от фрагментарных улучшений к системной реализации комплексной стратегии.

Список литературы:

1. Клёнов Г.И., Хорошков В.С. Адронная лучевая терапия: история статус перспективы // Успехи физических наук. – 2016, Т. 186, № 8. - С. 891 – 911. DOI: 10.3367/UFNr.2016.06.037823.
2. Кодина Г.Е. Институт биофизики – место рождения отечественной ядерной медицины // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2016, Т. 61, № 5. - С. 89–110
3. Высокоэффективны и безопасны. Применение методов радиационной медицины в диагностике и лечении онкологических, кардиологических и неврологических заболеваний // Кто есть кто в медицине. – 2023, № 1 (119). -С. 39.
4. Служба ядерной медицины Архангельской области отмечает десятилетие // Пресс-центр Правительства Архангельской области – Сетевое издание DVINANEWS. – 11.07.2024, электронный - <https://dvinanews.ru/news/detail/15081> (дата обращения 15.07.2026)
5. Удалов Ю.Д., Тихомиров Н.Е., Шарапова Т.В., Касымова О.А. Особенности обеспечения радиационной безопасности в ФГБУ ФНКЦРИО ФМБА России // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2022, Т. 67, № 3. - С. 94–98. DOI: 10.33266/1024-6177-2022-67-3-94-98.
6. Денисов А. В России появился первый аппарат для проведения ПЭТ/МРТ // Известия. - 02.05.2023, электронный - <https://iz.ru/1507021/2023-05-02/v-rossii-poiavilsia-pervyi-apparat-dlia-provedeniia-petmrt>. (дата обращения 15.07.2026)
7. Паринов О.В., Касымова О.А., Кретов А.С., Симагова Т.Д., Галстян И.А., Калинина М.Ю., Ломтева А.А., Власова И.В., Вьюнова А.А., Яроцкая А.А. Организация проведения обязательных предварительных и

периодических медицинских осмотров работников: методические указания. – Москва: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2026. – 74 с.

ТРЁХЦВЕТНОЕ FISH-ОКРАШИВАНИЕ ХРОСОМ И РЕТРОСПЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА ДОЗЫ

В.Ю. Нугис, В.А. Никитина, М.Г. Козлова, Е.Е. Ломоносова
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва
nugisvju@list.ru

Актуальность. При проведении медико-социальной экспертизы для установлении связи возникших заболеваний и инвалидности с возможным предшествующим переоблучением необходимо как верифицировать сам факт воздействия, так и ретроспективно оценить полученную дозу. В настоящее время для этого рекомендуется использовать цитогенетический FISH-метод (fluorescent in situ hybridization) [4].

Цель. Получить кривую доза-эффект для частоты реципрокных транслокаций в культурах лимфоцитов периферической крови относительно здоровых доноров после гамма-облучения *in vitro*. Выполнить цитогенетический анализ культур лимфоцитов периферической крови с помощью трёхцветного FISH-окрашивания хромосом у пациентов в отдалённые сроки после аварийного облучения. По полученным результатам произвести ретроспективные индикации доз и сравнить их с известными первоначальными оценками доз.

Материал и методы. Для построения дозовой зависимости для частоты транслокаций после воздействия гамма-лучей ^{60}Co *in vitro* была использована кровь трёх относительно здоровых доноров: двое мужчин (возраст – 35 лет и 41 год) и одна женщина (возраст – 28 лет) [2]. Дозы излучения составили 0,1; 0,15; 0,25; 0,35; 0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 и 3,0 Гр при мощности дозы 0,5 Гр/мин. При постановке культур лимфоцитов и при приготовлении препаратов хромосом следовали стандартным методикам, принятым

в лаборатории и аналогичным рекомендуемым МАГАТЭ [4]. Трёхцветное FISH-окрашивание препаратов производили в соответствии с фирменной инструкцией («MetaSystems», Германия). При этом использовали два набора ДНК-зондов: для 1, 4 и 12 пар хромосом и для 2, 3 и 8 пар хромосом.

Для проведения цитогенетических исследований в отдалённые сроки после случайного гамма- или гамма-бета-облучения была использована венозная кровь четырёх пациентов, пострадавших в различных ситуациях (двое при ликвидации аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г.) [1]. У них были произведены первоначальные оценки доз или по ЭПР-сигналу в эмали зуба (1 человек – 1,12 Гр), или по частотам дицентриков в культурах лимфоцитов в ближайшие сроки после облучения (3 человека – 1,9; 3,2 и 4,3 Гр). В этом заключается отличие наших данных от несомненно более масштабных ретроспективных цитогенетических исследований, выполненных на японской когорте после атомной бомбардировки, когда полученные дозы определяли расчётными методами спустя длительное время после облучения [3]. Анализ осуществляли с помощью одного из двух выше обозначенных наборов ДНК-зондов.

Результаты. Для проведения цитогенетической индикации дозы рекомендуется иметь собственные кривые доза-эффект для различных показателей, как в ближайшие, так и в отдалённые сроки после облучения. Именно этим обусловлена выполненная нами работа по анализу частот транслокаций и других аберраций хромосом с помощью трёхцветного FISH-метода после гамма-облучения *in vitro* крови доноров. При этом разные авторы могут использовать наборы ДНК-зонды для разных пар хромосом. Поэтому для сравнения результатов обычно выполняют перевод частоты регистрируемых перестроек в их геномный эквивалент, т.е. в расчёте на весь геном, подразумевая, что количество индуцируемых аберраций зависит только от относительного количества ДНК, содержащегося в разных парах хромосом. Однако периодически появляются сообщения о разной радиочувствительности отдельных хромосом. Поэтому мы решили сравнить выходы радиационно-индуцированных транслокаций при использовании двух наборов ДНК-зондов для пар хромосом с примерно в сумме совпадающим относительным количеством ДНК

(в нашем случае около 20% от всего кариотипа). Оказалось, что полученные зависимости как для частоты транслокаций во всех клетках, так и только в стабильных клетках значимо не различались друг от друга. Данное обстоятельство позволило объединить данные и построить общие кривые. Отметим, что стабильными называют неаберрантные клетки и метафазы с только стабильными абберациями хромосом, а нестабильными – клетки, хотя бы с одной нестабильной перестройкой. Т.к. в отдалённые сроки после облучения в основном обнаруживаются стабильные клетки, то ниже представлено полученное линейно-квадратичное уравнения для связи с дозой наблюдаемых частот транслокаций только в этом типе клеток:

$$Y = (0,12 \pm 0,30) + (1,82 \pm 0,62) \times D + (1,65 \pm 0,21) \times D^2, \quad (1)$$

где Y – наблюдаемые частоты транслокаций на 100 стабильных клеток; D – доза, Гр.

С целью применения полученных данных при использовании других наборов ДНК-зондов они были пересчитаны на весь геном, а также добавлен коэффициент C, равный фоновой средней геномной частоте транслокаций у людей определённого возраста. Она может быть взята из международного исследования [5]. Ниже представлено соответствующее линейно-квадратичные уравнения:

$$YG = C + (5,56 \pm 1,23) \times D + (4,71 \pm 0,50) \times D^2, \quad (2)$$

где YG – геномные частоты транслокаций на 100 стабильных клеток; D – доза, Гр.

У одного из пациентов (доза – 3,2 Гр), которые были обследованы с помощью трёхцветного FISH-окрашивания в отдалённые сроки после облучения, заборы крови производились неоднократно (10 раз) в интервале 27,9-34,4 года после аварии на Чернобыльской АЭС, когда он поступал в Клинику ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна. Наблюдавшиеся уровни транслокаций в этом промежутке времени значимо не различались между собой. Поэтому полученные данные были объединены. Лимфоциты периферической крови ещё одного чернобыльского пациента (доза – 4,3 Гр) подвергались цитогенетическому анализу дважды: через 30,1 и 30,5 лет после аварии. Особенность этого случая состоит в том, что в эти моменты он уже болел миелодиспластическим синдромом с переходом в острый миелобластный лейкоз, причём во второй раз кровь забирали уже после двух курсов лечения

цитостатиком вайдаза (5-азацитидин). Однако, как и у предыдущего пациента различия между двумя исследованиями были статистически несущественными. У двух оставшихся пациентов, пострадавших в двух других радиационных инцидентах, повторные цитогенетические исследования были выполнены по одному разу.

Ретроспективную оценку дозы осуществляли по приведенному выше уравнению (2) с подстановкой в качестве постоянного коэффициента C зависящей от возраста фоновой геномной частоты транслокаций из работы [5]. В результате у пациентов с первоначальной оценкой полученной дозы 1,12; 1,9; 3,2 и 4,3 Гр ретроспективные оценки оказались равными 1,09; 1,24; 2,05 и 2,45 Гр соответственно. Как можно видеть, только для наименьшей первоначально установленной дозы наблюдается её совпадение с оценкой в отдалённые сроки. При большем уровне поражения ретроспективные оценки указываются ниже исходных оценок, что связывают с элиминацией нестабильных клеток, несущих как стабильные, так и нестабильные абберации хромосом.

Было получено уравнение линейной регрессии для связи ретроспективных и первоначальных оценок ($r = 0,989$, $p = 0,011$):

$$D_T = (0,506 \pm 0,143) + (0,457 \pm 0,049) \times D_0,$$

где D_T – ретроспективная оценка дозы (Гр); D_0 – первоначальная оценка дозы (Гр). Это уравнение в первом приближении может быть использовано для оценки дозы в отдалённые сроки после облучения.

Выводы

1. С помощью трёхцветного FISH-окрашивания хромосом в культурах лимфоцитов периферической крови были получены дозовые зависимости для транслокаций, которые могут быть использованы для оценок доз в отдалённые сроки после облучения.

2. Между первоначальными оценками дозы и её ретроспективными оценками, основанными на использовании трёхцветного FISH-окрашивания хромосом, наблюдается сильная корреляция.

3. При дозах больше 1,1 Гр требуется коррекция ретроспективных оценок с помощью полученной линейной зависимости, которая нуждается в дальнейшем уточнении.

Список литературы:

1. Ломоносова Е.Е., Нугис В.Ю., Козлова М.Г. и др. Трёхцветный FISH-метод: сравнение ретроспективных цитогенетических дозовых оценок у разных пациентов, подвергшихся острому аварийному облучению // Радиационная биология. Радиоэкология. 2023. Т. 63. № 3. С. 240-249.
2. Нугис В.Ю., Снигирёва Г.П., Ломоносова Е.Е. и др. Трёхцветный FISH-метод: кривые доза-эффект для транслокаций в культурах лимфоцитов периферической крови после гамма-облучения *in vitro* // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020. Т. 65. № 5. С. 12-20.
3. Архипова В.И., Паринов О.В., Лягинская А.М., Метляев Е.Г., Максимова П.В. Радиационная безопасность. патогенетические механизмы заболеваемости в условиях действия малых доз радиации// Ильинские чтения 2026. Сборник материалов международного Научно-практического форума молодых ученых и специалистов. Москва, 2026. С. 57-59.
4. Awa A. Mutation Research at ABCC/RERF: cytogenetic studies of atomic bomb exposed population // Mutation Research. 2003. V. 543. № 1-2. P. 1-15.
5. Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies. Vienna: IAEA, 2011. 240 p.
6. Whitehouse CA, Edwards AA, Tawn EJ et al. Translocation yields in peripheral blood lymphocytes from control populations. Int. J. Radiat. Biol.. 2005. V. 81. № 2. P. 139–145.

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОСУЩЕСТВЛЕНИИ МОРСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

*Ю.В. Грабский, Д.Ю. Rogованов, С.В. Натха, Д.В. Арефьева
ФГБУН НИИ ПММ ФМБА России, г. Санкт-Петербург*

Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2035 года и Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года предусматривают активное развитие транспортной и энергетической инфраструктуры, повышение интенсивности промышленного использования Северного морского пути, освоения минерально-сырьевых ресурсов северных регионов и арктического шельфа. Решение указанных задач невозможно без развития флота атомных морских объектов (АМО) – судов с ядерными энергетическими установками (ЯЭУ), плавучих атомных энергоблоков, судов атомного технологического обслуживания. Увеличение мощности используемых судовых ЯЭУ, расширение географии эксплуатации АМО и повышение интенсивности морских перевозок обуславливают необходимость совершенствования системы обеспечения радиационной безопасности персонала данных объектов, работников морских портов, а также населения приморских регионов.

Строительство и эксплуатация отечественного атомного ледокольного флота тесно связаны с работами НИИ промышленной и морской медицины ФМБА России. Сотрудникам института были проведены многочисленные исследования по оценке состояния здоровья членов экипажей первого отечественного атомного ледокола «Ленин», атомных ледоколов «Советский Союз», «Арктика», «50 лет Победы», «Ямал», «Вайгач». Выполнен ряд экспедиционных исследований на борту атомных судов при следовании Северным морским путем, в том числе на Северном полюсе. В ходе работ были получены уникальные научные данные, которые легли в основу гигиенических требований, методических указаний и рекомендаций по контролю условий труда и состояния здоровья членов экипажа, ранней

диагностике и профилактике заболеваний. Одновременно проводились исследования по разработке систем радиационного (дозиметрического и технологического) контроля, а также исследования по физиологии труда.

В начале 2000-х годов были разработаны и внедрены в практику регулирования радиационной безопасности нормативные правовые акты: Санитарные правила СП 2.6.1.11-02 «Обеспечение радиационной безопасности при проектировании, строительстве, эксплуатации и утилизации судов атомно-технологического обслуживания» (СП-САТО-2001), Санитарные правила СП 2.6.1.45-03 «Обеспечение радиационной безопасности при проектировании, строительстве, эксплуатации и выводе из эксплуатации атомных теплоэлектростанций малой мощности на базе плавучего энергетического блока» (СП АТЭС-2003), Санитарные правила СП 2.6.12040-05 «Обеспечение радиационной безопасности при проектировании, строительстве, эксплуатации и выводе из эксплуатации атомных судов» (СП РБ АС-2005). Разработка указанных документов позволила сформировать нормативную основу для санитарно-эпидемиологического обеспечения радиационной безопасности персонала АМО, а также населения, проживающего в зоне их эксплуатации, с учетом специфики данных объектов.

В 2020-2025 годы сотрудники ФГБУН НИИ ПММ ФМБА России приняли участие в работе комиссий по приемке универсальных двухосадочных атомных ледоколов нового проекта 22220 – головного «Арктика» и серийных «Сибирь», «Урал» и «Якутия».

Помимо того, на протяжении многих лет специалисты института осуществляют научно-техническое сопровождение создания плавучих атомных энергоблоков. Первая версия проектной документации на строительство плавучей атомной (тепло) электростанции (ПАТЭС) была рассмотрена институтом в 1973 году. В дальнейшем документация дорабатывалась в связи с вносимыми конструктивными изменениями. В 2007 году в России при непосредственном участии сотрудников института началось строительство первой в мире ПАТЭС «Академик Ломоносов», введение в промышленную эксплуатацию которой состоялось в 2019 году.

В настоящее время институт продолжает работу по рассмотрению и согласованию проектных решений для новых поколений плавучих атомных энергоблоков, оснащённых реакторными установками РИТМ-200 и РИТМ-400. При этом внимание уделяется оценке решений, влияющих не только на обеспечение радиационной безопасности, но и на условия труда персонала в целом, а также на факторы обитаемости данных объектов.

Еще одним успешным примером комплексного научно-технического сопровождения работ по обеспечению радиационной безопасности АМО является участие специалистов института в уникальных работах по выводу из эксплуатации и утилизации плавучей технической базы «Лепсе». Данные работы включали сопровождение разработки проектной документации, анализ принятых решений по обеспечению радиационной безопасности, направленных на минимизацию воздействия ионизирующего излучения, участие в инспекционных исследованиях по оценке радиационной обстановки на заключительных этапах вывода объекта из эксплуатации.

Совершенствование судовых реакторных установок позволяет увеличивать энергетические возможности АМО при сохранении ограниченных массогабаритных характеристик. Одновременно расширяются районы эксплуатации объектов. В совокупности это приводит к изменению условий обеспечения радиационной безопасности и обуславливает новые требования к используемым методам радиационного контроля и санитарно-эпидемиологического обеспечения.

В связи с этим необходим пересмотр действующих санитарных правил, разработанные в начале 2000-х годов. Отсутствие решения данного вопроса приведет к целому комплексу негативных последствий:

1. Последствия для здоровья и профессионального долголетия работников

Возросшая мощность новых реакторных установок АМО при наличии разночтений в нормативах мощности доз для зон свободного и контролируемого доступа персонала может привести к ошибкам при проектировании биологической защиты и как следствие – к повышению доз облучения персонала. Существующие санитарно-гигиенические нормы для данных объектов не

учитывают кумулятивный эффект от воздействия на персонал радиационных и нерадиационных факторов (шума, вибрации, гиподинамии, отсутствия полноспектрального света и т. д.). Для членов экипажа повышается риск возникновения депрессивных расстройств и существенного снижения когнитивных функций. Это не только провоцирует профессиональные заболевания, но и увеличивает время выполнения радиационно опасных работ, что может привести к росту дозы облучения, особенно в нештатных и аварийных ситуациях.

2. Социально-экономические последствия

Риски для здоровья и профессионального долголетия работников обуславливают рост вероятности острых заболеваний и травм на борту судна, а также преждевременной утраты трудоспособности плавсостава. Это приводит к увеличению расходов на оказание медицинской помощи на борту судна, на последующее оказание медицинской помощи и реабилитацию, а также к росту страховых выплат. Срочная медицинская эвакуация с борта судна (особенно из труднодоступных районов Арктики) представляет собой высокзатратное мероприятие в связи с необходимостью задействования дополнительных транспортных средств и каналов связи, зачастую она сопряжена с необходимостью изменения маршрута движения судна и (или) задержки следования по маршруту, что обуславливает значительные экономические потери. Помимо этого, ввиду неактуальных требований в проекты АМО закладываются избыточные технические решения. Это ведет к необоснованному увеличению стоимости и массогабаритных характеристик объектов без реального прироста безопасности. Ошибки, заложенные на этапе проектирования из-за неясности норм, приходится исправлять на готовом судне, что ведет к увеличению сроков его ввода в эксплуатацию. При сохранении текущей ситуации еще на 5-7 лет (средний цикл проектирования и строительства одного атомного судна) в каждый новый объект будут заложены риски на весь срок его службы, составляющий 30-40 лет.

3. Юридические последствия

Вследствие сложившейся правовой неопределенности проектные организации при подготовке технической документации на АМО используют «старые» (отмененные либо признанные не

обязательными) нормативные документы в качестве справочной информации, не имея законных оснований для их соблюдения. Это же обстоятельство лишает органы санитарно-эпидемиологического надзора (контроля) правовой базы для объективной оценки объектов на соответствие нормативным требованиям при приемке и проведении последующих проверок. В случае возникновения на борту судна группового заболевания или иного серьезного инцидента отсутствие четких санитарно-эпидемиологических норм делает невозможным установление вины и привлечение к ответственности, а также создает основания для оспаривания предписаний надзорных органов в суде.

Специалистами ФГБУН НИИ ПММ ФМБА России начаты работы по переработке вышеуказанных нормативных правовых актов. Целью работы является актуализация требований с учетом современного уровня развития АМО, накопленного опыта их эксплуатации и изменений в нормативно-методической базе. Результаты исследований могут быть также востребованы международными организациями, например, МАГАТЭ, поскольку международные стандарты в области эксплуатации АМО отсутствуют.

Развитие атомного флота непосредственно связано с необходимостью обеспечения радиационной безопасности не только на самих АМО, но и в морских портах, в которые разрешен заход судов и иных плавсредств с ЯЭУ, судов атомного технологического обслуживания и плавучих атомных энергоблоков. Это предусмотрено Единым планом мероприятий по реализации Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года.

Перечень морских портов Российской Федерации, которые могут принимать АМО для захода и стоянки, определен Распоряжением Правительства Российской Федерации от 06.01.1997 № 14-р. Заход и стоянка осуществляются в целях снабжения АМО продовольствием, топливом, пресной водой, передачи всех категорий судовых (в том числе и радиоактивных) отходов, проведения ремонтных работ, докового ремонта, водолазного осмотра судна, смены членов экипажа судна, посадки или высадки пассажиров и т. д. Необходимость обеспечения

радиационной безопасности при штатных и аварийных ситуациях связана с наличием на АМО источников ионизирующего излучения.

Разработанные институтом и введенные в действие в 2004 году Санитарные правила СП 2.6.1.01-04 «Обеспечение радиационной безопасности портов Российской Федерации при заходе и стоянке в них атомных судов, судов атомно-технологического обслуживания и плавучих энергоблоков атомных теплоэлектростанций» (СПРБП-04) в настоящее время не являются обязательными и требуют пересмотра, поскольку не соответствуют нормативным документам в сфере морского судоходства и радиационной безопасности, а также современной терминологии, используемой при регулировании деятельности в морских портах.

В связи с этим ФГБУН НИИ ПММ ФМБА России разработана новая редакция санитарных правил. Проект рассмотрен профильными организациями (Генеральная инспекция Госкорпорации «Росатом», ФГУП «Атомфлот», администрации морских портов, научно-исследовательские организации и др.) и готовится к представлению на утверждение установленным порядком. Внедрение Санитарных правил позволит внедрить комплекс санитарно-гигиенических мероприятий, направленных на обеспечение радиационной безопасности персонала, населения и окружающей среды в морских портах Российской Федерации при заходе и стоянке в них АМО, как в штатных условиях, так и при возникновении аварийных ситуаций.

Можно уверенно констатировать, что в результате многолетнего участия ФГБУН НИИ ПММ ФМБА России в решении научных проблем медико-санитарного обеспечения радиационной безопасности морской деятельности Российской Федерации сформирована обширная система знаний, позволяющая реализовать полученный научный, методический и практический опыт. Развитие атомного ледокольного флота, повышение мощности и совершенствование судовых ЯЭУ, а также расширение масштабов эксплуатации АМО в Арктической зоне Российской Федерации обуславливают необходимость проведения дальнейших исследований. К числу наиболее актуальных направлений относятся:

- совершенствование системы обеспечения безопасных условий труда и охраны здоровья персонала АМО,

– обоснование системы оценки уровня когнитивного здоровья и поддержки принятия решений при психологическом сопровождении членов экипажей судов с ЯЭУ в условиях Арктики.

Таким образом, ФГБУН НИИ ПММ ФМБА России продолжает выполнять роль одного из ключевых научно-методических центров, осуществляющего научное сопровождение строительства и эксплуатации АМО на протяжении всего их жизненного цикла и включает экспертную оценку проектных решений, участие в испытаниях и приемке объектов, а также совершенствование нормативной базы обеспечения радиационной безопасности морской деятельности для персонала и населения.

Список литературы:

1. Полвека в прикладной науке и медицине труда (к 50-летию федерального государственного унитарного предприятия Научно-исследовательского института промышленной и морской медицины Федерального медико-биологического агентства) / под ред. проф. А.В. Иванченко. СПб.: ООО «Сборка», 2017. 240 с.

2. Грабский Ю.В., Бумай О.К., Воронкова С.В. Научные исследования в развитии медицинского обеспечения атомного флота (к 75-летию ФМБА России). Санитарный врач. 2022; 8: 615–622. doi 10.33920/med-08-2208-09.

3. Проблемы нормативного обеспечения обитаемости и безопасных условий труда на атомных морских объектах: аналитическое исследование / Д. В. Арефьева, Ю. В. Грабский, Д. Ю. Рогованов [и др.] // Морская медицина. – 2025. – Т. 11, № 1. – С. 96-103. – DOI 10.22328/2413-5747-2025-11-1-96-103. – EDN IHEFKI.

4. Медицинские аспекты радиационной безопасности на Северном морском пути / Д. В. Арефьева, Ю. В. Грабский, Н. А. Кожухова [и др.] // Арктика: перспективы, инновации и развитие регионов : IX Международный Арктический саммит : сборник материалов, Москва - Санкт-Петербург, 22–25 апреля 2025 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, 2025. – С. 216-223. – EDN SZQHIC.

МЕТОДИКА ЭКСТРАКЦИОННО-ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО ВЫДЕЛЕНИЯ АКТИНОИДОВ ИЗ ПРОБ БИОСУБСТРАТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭКСТРАКЦИОННЫХ СМОЛ UTEVA И TRU

Е.Ю. Максимова, Н.П. Поцяпун, С.Н. Павлова, О.С. Баженова
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, г. Москва
[*emaksa@mail.ru*](mailto:emaksa@mail.ru)

Актуальность. Необходимость разработки и утверждения новой методики измерения содержания в биосубстратах человека изотопов урана, плутония и америция возникла при внедрении в производство новых видов ядерного топлива.

При увеличивающихся объемах производства возрастает и число работников, которые должны быть обследованы на поступление радионуклидов в организм. Необходимость оценки уровней поступления в организм и ожидаемых эффективных доз внутреннего облучения вытекает из требований нормативных документов по обеспечению радиационной безопасности персонала и населения [1, 2].

Разрабатываемая методика должна была обладать высокой чувствительностью и селективностью, поскольку для изотопов плутония и америция крайне важно определять даже самые низкие значения активностей, чтобы избежать неоправданно высокого завышения результатов оценки дозы внутреннего облучения.

За последние годы на рынке сорбционных материалов появились новые высокоэффективные твердофазные экстрагенты производства компании Eichrom Technologies, Inc. (США), обладающие высокой селективностью и используемые для разделения трансурановых элементов и актиноидов.

Данные сорбционные материалы были выбраны для разработки экстракционно-хроматографической методики измерений содержания радионуклидов в биосубстратах, которая позволяла бы решать, согласно требованиям действующих нормативных и методических документов, задачи индивидуального дозиметрического контроля внутреннего облучения при

ингаляционном поступлении актиноидов (изотопов урана, плутония и америция) при их одновременном присутствии.

В основу методики взяты базовые методики производителя сорбционными материалами Eichrom ACU02 и Eichrom ACU02VBS [3, 4].

Цель. Разработка и внедрение в деятельность лабораторий дозиметрии внутреннего облучения высокочувствительной, селективной и эффективной методики измерения содержания актиноидов (изотопов урана, плутония и америция) в биосубстратах персонала производств новых видов ядерного топлива.

Материалы и методы. За основу разработки методики были взяты базовые методики Eichrom ACU02/ACU02VBS [3, 4], которые содержат в себе описание процедур радиохимического разделения на смолах, но не содержат сведения о процедурах пробоподготовки, требования безопасности, контроля качества, проведения измерений, а также не имеют свидетельства об аттестации, что делает невозможным их использование при проведении индивидуального дозиметрического контроля внутреннего облучения на предприятиях атомной отрасли.

Для разделения фракций изотопов U, Pu и Am с целью последующего спектрометрического анализа был выбран экстракционно-хроматографический метод. В качестве твердофазных экстрагентов использовались высокоселективные к актиноидам смолы – смола UTEVA (пр-ва Triskem Inc.), содержащая фосфорорганический компонент диамиламилфосфонат, и смола TRU (Triskem Int.), содержащая экстрагент октилфенил-N,N-диизобутилкарбамоилметилфосфин оксид, разбавленный трибутилфосфатом (ТБФ). Америций, плутоний и уран выделялись на смолах Eichrom UTEVA и TRU для последующего альфа-спектрометрического измерения [5]. Для концентрирования актиноидов из проб мочи применялось соосаждение с фосфатом кальция. Для определения химического выхода с целью контроля правильности и точности на начальном этапе радиохимического анализа использовались реперы (радионуклиды ^{232}U , ^{242}Pu , ^{243}Am).

Все используемые в методике химические реактивы имели квалификацию ХЧ (химически чистые) или ОСЧ (особо чистые).

Измерение энергетических спектров альфа-излучения выделенных на стальную подложку при электролитическом осаждении радионуклидов урана, плутония и америция измерялось

на альфа-спектрометрах типа Alpha Analyst (пр-во фирмы CANBERRA Industries, США).

Результаты. Для проведения экспериментов использовали модельные пробы – образцы мочи с внесенными известными количествами определяемых радионуклидов. В каждую пробу вносились по два радионуклида каждого из трёх актиноидов: (^{232}U + ^{236}U), (^{242}Pu + ^{239}Pu), (^{243}Am + ^{241}Am). Первый из радионуклидов в паре использовался в качестве метки, по химическому выходу которого оценивалось содержание в пробе второго радионуклида каждой пары. Работа проводилась с использованием соответствующих образцовых радиоактивных растворов (ОРР) всех радионуклидов, из которых готовились рабочие радиоактивные растворы (РРР).

В данной работе были использованы картриджи со смолой для экстракционной хроматографии UTEVA, 50-100 мкм (UT-R10-S) – для выделения изотопов урана и картриджи со смолой TRU, 50-100 мкм (TR-R10-S) – для выделения изотопов плутония и америция производства Triskem International, Франция. Использование заранее наполненных смолой фирменных картриджей упрощает работу, позволяет использовать меньше растворителей, что обеспечивает высокую селективность экстракции и особенно подходит для разделения образцов с низкой концентрацией компонентов, а также снижает вклад человеческого фактора в неопределенность анализа. Основным недостатком закупки уже готовых картриджей является их относительно высокая стоимость.

Отличительной чертой представленной методики является использование вакуумного бокса (AC-01-GAUGE, пр-во Eichrom Technologies, Inc. США), что позволяет уменьшить длительность радиохимического анализа (в 5 раз по сравнению с используемыми в настоящий момент методами), сохраняя при этом качество выделения искомых радионуклидов. Наполненные смолой картриджи Eichrom помещаются в вакуумный бокс, затем растворы образцов пропускают через картриджи при оптимальном вакуумном давлении.

После селективного радиохимического выделения определяемого химического элемента – америция, плутония и урана – путем электроосаждения на подложки из нержавеющей

стали в растворе электролита, готовился счетный образец для последующего альфа-спектрометрического измерения.

Электролиз проводили с использованием разборной электролитической ячейки из тефлона с диаметром активного пятна 25 мм. Состав электролитической ванны: 2,5 см³ 5% раствора гидросульфата натрия, 5 см³ дистиллированной воды и 5 см³ 15% раствора сульфата натрия с последующим добавлением в электролитическую ячейку, где производится выделение на мишень 1 см³ раствора оксалата аммония. Время электролитического выделения изотопа на подложку составило 90 минут при силе тока 0,75 А.

Длительность проведения радиохимического этапа – параллельной обработки двух проб мочи одним исполнителем и приготовления собственно счётного образца – до пяти рабочих дней. Длительность измерения на альфа-спектрометре – три рабочих дня (одни сутки).

Выводы. Разработанная методика является быстрым и воспроизводимым способом измерения актиноидов в биосубстратах. Она более эффективна и экономична по сравнению с традиционными методиками, основанными на использовании ионного обмена, жидкостной экстракции и осаждения, и позволяет решить, согласно требованиям действующих нормативных и методических документов, задачу индивидуального дозиметрического контроля внутреннего облучения при ингаляционном поступлении актиноидов (урана, плутония и америция) в организм для персонала производств новых видов ядерного топлива.

Сочетание смол UTEVA и TRU позволяет последовательно выделить изотопы урана, плутония и америция из одной пробы с высоким процентом экстракции.

Используемый метод позволяет эффективно разделять изотопы с неразрешающимися по энергии альфа-пиками, такие как, ²⁴¹Am и ²³⁸Pu, ²³⁷Np и ²³⁴U, или ²¹⁰Po и ²³²U.

Методика метрологически аттестована со следующими характеристиками: погрешность выполнения измерений для изотопов урана не превышает 45% при P=0,95, для изотопов плутония 53%, для изотопов америция 38%; расширенная

неопределенность при $P=0,95$: 49% для изотопов урана, 59% для изотопов плутония и 42% для изотопов америция.

Разработанная методика применялась специалистами Лаборатории дозиметрии инкорпорированных радионуклидов ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им.А.И. Бурназяна ФМБА России при проведении научных исследований по определению содержания радионуклидов в пробах мочи работников, занятых на производстве смешанного нитридного уран-плутониевого топлива (СНУП-топливо) и смешанного оксидного уран-плутониевого топлива (МОКС-топливо).

Список литературы:

1. ОСПОРБ 99/2010. СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности: Санитарные правила и нормативы, утвержденные постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26.04.2010 № 40.
2. НРБ-99/2009. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности: Санитарные правила и нормативы, утвержденные постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 07.06.2009 №47.
3. Eichrom Method ACU02: Americium, Plutonium and Uranium in Urine, Ver. 1.7 (<http://www.triskem-international.com/eichrom-methods-ru.php>).
4. Eichrom Method ACU02VBS: Americium, Plutonium and Uranium in Urine (with Vacuum Box System), Ver. 1.7 – EN (<http://www.triskem-international.com/eichrom-methods-ru.php>).
5. Thakkar A.A Rapid Method for Actinides and Strontium in Bioassay Samples Using Eichrom's Resin Cartridges. – In: Eichrom Users' Group Meeting December 9th, 2005 Manchester, UK.

ОЦЕНКА И УПРАВЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫМИ РИСКАМИ КАК НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОБЪЕКТОВ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ

*А.Ф. Бобров, Н. Л. Проскуракова
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, г. Москва,
nlpros@mail.ru*

Актуальность. На предприятиях атомной отрасли используются потенциально опасные технологии, которые при определенных условиях (сбой, ошибка человека, внешнее воздействие) могут выйти из-под контроля и привести к серьёзным последствиям: аварии, выбросу вредных веществ, пожару, взрыву, поражению людей или значительному материальному ущербу. Защита обеспечивается системным подходом к инженерно-техническим и социально-организационным решениям, используемым для достижения высокого уровня функционирования предприятий и объектов на всех этапах их жизненного цикла, в основе которого лежит обеспечение безопасности. Современные подходы к безопасности объектов использования атомной энергии строятся на концепции глубокоэшелонированной защиты. В ее основе лежит система физических барьеров, а также комплекс организационных и технических мер, направленных на поддержание их целостности [5]. Обеспечение безопасности является непрерывным процессом мониторинга: сбора, анализа и оценки данных о состоянии промышленной безопасности с целью предотвращения аварий, инцидентов и минимизации рисков для персонала, окружающей среды и производственных процессов. Оно включает использование автоматизированных систем, цифровых технологий, предиктивной аналитики и других инструментов для оперативного выявления и устранения угроз. Эта система поддерживается гигиеническими принципами и механизмами: трехзональная планировка, статические и динамические гигиенические барьеры, контролируемая зона, контрольные уровни, гигиеническая оценка технологических процессов и проектных решений [3]. Основной

целью создания такой системы является сохранение здоровья персонала, обеспечивающих функционирование радиационно опасных технологий. Другими словами, снижение риска здоровью (профессионального риска) работника.

Чернобыльская авария показала, что производственная среда является уязвимой в случае не регламентированных действий/бездействий работника. Это дало толчок исследованиям по изучению и оценке надежности человеческого фактора – антропогенного риска. На предприятиях атомной отрасли стали создаваться лаборатории профессиональной надежности персонала.

Рассматривая систему «человек-производственная среда» (СЧПС) можно утверждать, что новым направлением в совершенствовании радиационной безопасности предприятий и объектов атомной отрасли может являться оценка и управление комплексными рисками, интегрирующими в себе профессиональные и антропогенные риски[4].

Цель. Исследование посвящено разработке концепции оценки и управления комплексными рисками персонала особо опасных производств предприятий атомной отрасли.

Материал и методы. При проведении исследований были использованы информационно-аналитические методы анализа и результаты ранее проведенных собственных исследований.

Результаты. Как показывает практика, неблагоприятные внутренние и внешние факторы могут наносить ущерб СЧПС. Поскольку время и величина ущерба однозначно быть предсказаны не могут, вводят понятие «риск», которое является междисциплинарным и используется там, где есть какой-либо опасный агент или источник риска и возможность получения ущерба. Необходимыми и достаточными условиями возникновения риска являются: наличие источника риска; наличие путей воздействия источника риска на какой-либо объект; уязвимость объекта. Для характеристики СЧПС с позиций ее опасности для здоровья работника используют понятие профессионального риска: вероятность причинения вреда жизни и (или) здоровью работника в результате воздействия на него вредного и (или) опасного производственного фактора при исполнении им своей трудовой функции с учетом возможной тяжести повреждения здоровья. Но и сам работник является источником антропогенной опасности, под

которой понимается опасность, исходящая от людей, вызванная их непреднамеренными действиями (ошибки, неправильное использование оборудования и др.), бездействием или злонамеренными действиями (хищение, саботаж, диверсия, нападение, терроризм). А сам антропогенный риск может быть определен как количественная характеристика угрозы безопасности предприятия со стороны работника в процессе профессиональной деятельности, обусловленной несоответствием его медико-психофизиологических характеристик требованиям профессиональной деятельности и антропогенной уязвимости оборудования и технологических процессов. Профессиональный и антропогенный риск формируют комплексный профессиональный риск (КПР), под которым предлагается понимать характеристику угрозы здоровью работника из-за вредных и/или опасных производственных факторов и безопасности предприятия из-за несоответствия медико-психофизиологических характеристик работника требованиям деятельности.

Нами разработана структурная схема взаимоотношения компонентов, формирующих оценку КПР на объектах использования атомной энергии (ОИАЭ) и обслуживающих их медицинских организаций ФМБА России [1]. В число характеристик КПР со стороны ОИАЭ входят интегральная оценка условий труда, оцениваемая по данным специальной оценки (СОУТ) в соответствии с нормативными документами. Она определяет риск для здоровья работника и косвенно характеризует эффективность защитных барьеров от неблагоприятного влияния радиационно опасных технологий. В КПР со стороны предприятия также входит уровень/группа профессиональной адаптации (ГР_ПА), определяющий эффективность системы подготовки персонала на предприятии.

Со стороны медицинской организации, в показатели КПР включены: группа диспансерного наблюдения работника (ГР_ДН), оцениваемая в соответствии с Приказом Минздрава России от 27.04.2021 № 404н по данным периодических медицинских осмотров; уровень/группа психофизиологической адаптации (ГР_ПФА), оцениваемая по данным периодических психофизиологических обследований персонала и категория функциональной надёжности (КАТ_ФН) работника. ГР_ДН является нозологической, ГР_ПФА – донозологической характеристикой

состояния здоровья работника. Функциональная надежность [2] принимается за характеристику антропогенного риска.

Разработана информационная технология оценки КПР по описанным характеристикам, включающая модели оценки по 5-ти категориям риска здоровью работника и антропогенные риски. Для оценки величины КПР предлагается использовать матрицу риска размера 5x5 (табл.1).

Категории функциональной надёжности (антропогенного риска) работника	Категории уровня профессионального риска здоровью работника				
	1	2	3	4	5
1	1 (1)	2 (1)	3 (2)	4 (2)	5 (2)
2	2 (1)	4 (2)	6 (3)	8 (3)	10 (3)
3	3 (2)	6 (3)	9 (3)	12 (4)	15 (4)
4	4 (2)	8 (3)	12 (4)	16 (4)	20 (5)
5	5 (2)	10 (3)	15 (4)	20 (5)	25 (5)

Таблица 1 Матрица оценки комплексного профессионального риска

Примечание: В ячейках стоят значения комплексного профессионального риска $R_{кпр}$ (в баллах) и (в скобках) его категории: игнорируемый (1), приемлемый (2), допустимый (3), условно допустимый (4) и недопустимый (5) уровень риска.

Выводы. Проведенные исследования позволили выделить новое направление в комплексной оценке рисков, учитывающее не только влияние неблагоприятных факторов производственной среды на состояние здоровья работника, но и ответное его влияние на производственную среду. Это позволяет своевременно принимать организационные и медицинские решения не только по сохранению профессионального здоровья персонала, в том числе за счет повышения надежности человеческого фактора, но и в целом способствует поддержанию на высоком уровне системы обеспечения радиационной безопасности предприятий атомной отрасли.

Список литературы:

1. Бобров А.Ф., Риски в системе «Человек-производственная среда»: концептуальная модель, концепция оценки и управления/ А.Ф.Бобров, Н.Л. Проскурякова, Л.И. Фортунатова // Медицинская радиология и радиационная безопасность. –2025. –Т. 70, № 2. – С. 57-62.
2. Бушманов А.Ю., Калинина М.Ю., Щебланов В.Ю., Седин В.И., Бобров А.Ф., Фортунатова Л.И. Функциональная надёжность в системе

медико-психофизиологического обеспечения работников объектов использования атомной энергии – Москва, 2022. 91 с.

3. Гордон, Б. Г. Идеология безопасности. Труды НТЦ ЯРБ / Б. Г. Гордон. – Москва: [б.и.], 2006. – 236 с.

4. Проскурякова Н.Л. К вопросу управления комплексными профессиональными рисками в системе «Человек-Производственная среда» / Н.Л. Проскурякова, А.Ф. Бобров, Л. И. Фортунатова, В.Ю. Лизунов // Ильинские чтения 2026 : Сборник материалов международного Научно-практического форума молодых ученых и специалистов, Москва, 21 апреля 2026 года. – Москва: Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2026. – С. 106-108.

5. Самойлов А.С., Шандала Н.К., Квачева Ю.Е., Метляев Е.Г., Киселев С.М., Паринов О.В. Актуальные проблемы обеспечения радиационной безопасности населения Российской Федерации//Материалы IV Национального конгресса с международным участием по экологии человека, гигиене и медицине окружающей среды «Сысинские чтения 2024»: Сборник тезисов. - Тверь, 2024. - С. 130-131.

6. Удалов Ю. Д., Колышкин А. Е. , Лебедев А. О. , Голобородько Е. В. [и др.]. Безопасность как система //Новый атомный эксперт, – №5, – 2026 https://atomicexpertnew.ru/security_system_in_the_soviet_nuclear_industry

ТЕХНОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ ОЦЕНКИ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЧЕЛОВЕКА И ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ В УСЛОВИЯХ СОЧЕТАННОГО ДЕЙСТВИЯ ЭКОТОКСИКАНТОВ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ

*С.М. Киселёв, Н.К. Шандала, Ю.Н. Зозуль, Л.П. Сычева
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, г. Москва,
sm_kiselev@mail.ru*

Актуальность. Техногенное загрязнение объектов ядерного наследия и действующая система контроля за их состоянием рассматриваются преимущественно с учетом специфики осуществляемой деятельности с фокусом на радиационный фактор.

Вместе с тем накопленный опыт исследований показывает, что особенность воздействия на окружающую среду на этих территориях носит многофакторный характер и определяется широким спектром экотоксикантов [1]. Многообразие загрязнителей различной природы формирует условия для комбинированного воздействия на объекты окружающей среды и организм человека. Проблема оценки сочетанного воздействия различных экотоксикантов представляет собой одну из наиболее сложных задач, решение которой диктует необходимость применения междисциплинарного подхода.

Цель. Разработка технологии исследовательского эколого-гигиенического мониторинга, ориентированного на оценку сочетанного действия внешних факторов в техногенно измененной среде на человека и окружающую среду.

Материалы и методы: Объектами исследования являлись бывшие береговые технические базы военно-морского флота по обслуживанию атомных подводных лодок в Северо-Западном и Дальневосточном регионах России [2, 3]. Особенности загрязнения территорий ядерного наследия изучали в формате скрининговых исследований содержания экотоксикантов в объектах окружающей среды. Использовали спектр радиометрических, спектрометрических, радиохимических методов анализа, а также усовершенствованную методику интегральной оценки МАЭД на местности с применением термолюминесцентных дозиметров. Экотоксичность природных сред определяли методами биологического мониторинга, применяя методы биоиндикации (флуктуирующей асимметрии листьев и фертильности пыльцы) и биотестирования (Аллиум-тест). Для мониторинга риска неблагоприятных последствий для здоровья персонала и населения применен усовершенствованный метод цитогенетического тестирования на основе буккального микроядерного цитомного теста (БМЦТ).

Результаты. Предложена технология исследовательского мониторинга в эколого-гигиеническом контексте: её основу составляет трёхуровневая система оценки, реализуемая в связке «компонент природной среды - биота - человек». В основе технологии лежит реализация интегрального подхода, ориентированного на исследование потенциала сочетанного воздействия загрязнителей различной природы на окружающую среду и здоровье человека на территориях расположения объектов

ядерного наследия. Ключевая научная проблема, решаемая данной технологией, заключается в преодолении методологической несопоставимости существующих гигиенических критериев для веществ различной природы, что ранее не позволяло проводить комплексную сравнительную оценку территорий. Первый уровень комплексного эколого-гигиенического мониторинга (КЭГМ) ориентирован выявления приоритетных загрязнителей и установления пространственно-временных закономерностей их распределения в компонентах природной среды. Для систематизации результатов мониторинговых исследований предложен интегральный коэффициент загрязнения и разработан универсальный алгоритм его расчёта. Данный инструментарий составляет аналитическое ядро первого уровня технологии, обеспечивая переход от фактического набора информационных данных о содержании различных экотоксикантов в объектах природной среды к структурированной характеристике загрязнения территории [4].

Второй уровень КЭГМ направлен на оценку качества окружающей среды, в условиях сочетанного загрязнения. Эта задача решается с применением технологий биологического мониторинга. В качестве сенсоров выступают биологические тест-объекты, которые интегрируют суммарный биологический эффект всех действующих факторов внешней среды, включая как радиационные, так и химические стрессоры. Такой подход позволяет выявлять ранние изменения в экосистемах на разных уровнях организации живых организмов. Результаты совместных исследований с учёными Всероссийского научно-исследовательского института радиологии и агроэкологии, проведённых на объектах ядерного наследия в Приморском крае и на Кольском полуострове, подтвердили, что биоиндикационные методы, интегрированные в технологию КЭГМ, могут служить надёжным скрининговым инструментом для экспресс-оценки состояния среды в зонах техногенного воздействия [5]. Этот уровень технологии существенно расширяет информативность мониторинга, поскольку фиксирует не только концентрации поллютантов, но и их реальные экологические последствия.

Третий уровень КЭГМ посвящён изучению ответных реакций организма человека на комплексное воздействие факторов внешней среды и ориентирован на оценку и прогнозирование

рисков неблагоприятных последствий для здоровья человека. В качестве инструмента исследования ответной реакции организма применен усовершенствованный метод БМЦТ в формате многолетних мониторинговых исследований. На индивидуальном и групповом уровне в составе производственных коллективов и групп населения апробирован персонифицированный подход для оценки риска неблагоприятных последствий на здоровье человека в условиях комплексного воздействия факторов внешней среды на основе оценки цитогенетического статуса [6].

Методической основой предложенной технологии исследовательского КЭГМ является комплекс разработанных методических документов. Развитие аналитического аппарата технологии предусматривает создание единой информационно-аналитической платформы: она базируется на массиве накопленных данных о загрязнении окружающей среды и обеспечивает визуализацию результатов оценки эколого-гигиенической обстановки [7].

Выводы. Разработанная технология КЭГМ представляет собой не просто совокупность методов, а целостную методологическую конструкцию, в которой данные скрининга (уровень 1), биоиндикации (уровень 2) и медико-биологической диагностики (уровень 3) логически взаимосвязаны и образуют единую доказательную цепочку – от источника загрязнения до прогноза последствий для здоровья. Применение данной технологии позволяет перейти от фрагментарных эпизодических наблюдений к системному мониторингу с обратной связью, обеспечивая научно обоснованное принятие управленческих решений по снижению рисков на территориях ядерного наследия. Дальнейшее развитие технологии предполагает цифровизацию алгоритмов, создание баз данных интегральных показателей и внедрение элементов искусственного интеллекта для автоматизированного прогнозирования.

Список литературы:

1. Петин В.Г., Дергачева И.П., Жураковская Г.П. Комбинированное биологическое действие ионизирующих излучений и других вредных факторов окружающей среды (научный обзор) // Радиация и риск : Бюлл. Нац. радиац.-эпидемиол. регистра. — 2001. — № 12. — С. 117–134.

2. Radiation safety during remediation of the SevRAO facilities: 10 years of regulatory experience / M.K. Sneve, N. Shandala, S. Kiselev [et al.] // Journal of Radiological Protection. – 2015. – Vol. 35, No. 3. – P. 571-596. – DOI 10.1088/0952-4746/35/3/571. – EDN UZYEFL.

3. Comprehensive environmental monitoring during remediation of a nuclear legacy site in the Far East of Russia / S. Kiselev, N. Shandala, T. Laschenova [et al.] // Journal of Radiological Protection. – 2021. – Vol. 41, No. 3. – P. S216-S229. – DOI 10.1088/1361-6498/abecf4. – EDN UEAWPG.

4. Интегральная оценка эколого-гигиенической обстановки в районах расположения объектов ядерного наследия / С. М. Киселёв, В. В. Шлыгин, Ю. Н. Зозуль [и др.] // Здоровье и окружающая среда. – 2024. – № 34. – С. 54-59. – EDN KIRFOS.

5. Биологический мониторинг на объектах ядерного наследия / С.М. Киселёв, С.А. Гераськин, В.В. Шлыгин [и др.] // Медицинские и экологические эффекты ионизирующего излучения: Материалы VIII Международной научно-практической конференции, посвященной 25-летию образования Северского биофизического научного центра, Северск – Томск, 09–11 сентября 2025 года. – Северск – Томск: АлКом, 2025. – С. 105-106. – EDN YTCKWQ.

6. Сычева, Л.П. Цитогенетический мониторинг с использованием буккального микроядерного цитомного теста (БМЦТ) / Л.П. Сычева, С.М. Киселёв, Н.К. Шандала // Медицинская генетика. – 2025. – Т. 24, № 8. – С. 125-127. – DOI 10.25557/2073-7998.2025.08.125-127. – EDN QAMDBF.

7. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020622185 Российская Федерация. Информационная система (база данных) комплексного радиоэкологического мониторинга на исследуемых объектах по утилизации АПЛ: № 2020622097 : заявл. 29.10.2020 : опубл. 06.11.2020 / С.В. Ахромеев, И. К. Теснов, Ю. Н. Зозуль [и др.].

РАДИАЦИОННО-ГИГИЕНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЗАКАЧКИ ЖИДКИХ СРЕД, СОДЕРЖАЩИХ ТРИТИЙ, В ГЛУБИННЫЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ФОРМАЦИИ

В.Г. Барчуков, А.А. Максимов, О.А. Кочетков, Д.И. Кабанов
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, г. Москва
barchval@yandex.ru

Актуальность. Как известно энергетическая самодостаточность является краеугольным камнем суверенитета любой страны. В настоящее время для решения этого вопроса в промышленно развитых странах активно развивается атомная энергетика, которая все активнее вытесняет углеводороды [1]. Следует отметить, что сегодня Россия является одним из лидеров в области разработки ядерных технологий получения электроэнергии. Эта технология в настоящее время рассматривается как экологически наиболее чистая.

Однако полностью экологически безопасными ядерные энергетические реактора назвать нельзя. Несмотря на совершенные технологии очистки полностью избавиться от выбросов радионуклидов в окружающую среду не представляется возможным. Основными выбросами при работе энергетических реакторов являются инертные газы и тритий [2], причем первые обуславливают внешнее облучение, а тритий формирует ожидаемую эффективную дозу внутреннего облучения. В сбросах же основной вклад формирует тритий.

Развитие новых технологий, в частности проект «Прорыв», с локализацией на одной площадке производства топлива, его использование и регенерацию, позволяет снизить стоимость электроэнергии, а также объемы поступления в окружающую среду трансурановых радионуклидов. В тоже время по расчетным данным, вследствие технологических особенностей эта технология приведет к увеличению выхода трития, что в свою очередь существенно увеличит его выбросы по сравнению с реакторами типа ВВЭР-1000 [3].

Еще большее поступление трития в окружающую среду прогнозируют с вводом в промышленную эксплуатацию

термоядерных реакторов [4]. По расчетным данным количества образующегося трития с 2035 года начнет расти и снова превысит природный фон [5].

Цель. Целью исследований стало анализ и обобщение результатов радиационно-гигиенических исследований практического использования технологического решения закачки жидких сред, содержащих тритий в глубинные геологические формации.

Материалы и методы. Для проведения исследований нами был разработан уникальный методический комплекс, позволяющий оценить содержания трития во всех существующих формах. Разработанный методический комплекс позволяет оценить содержания трития и его соединений во всех средах (в воздухе [6], в воде и биологических жидкостях[7], а также в твердых пробах (грунт, продукты питания, растительность) [8]).

Для практической реализации разработанного методического комплекса нами был взят современный парк устройств отбора и подготовки проб, а также их измерения. Для исследования содержания трития в воздухе использованы пробоотборные устройства на основе барботирования [9]. В грунте и растительности, включая продукты питания, извлечение трития было основано на их высокотемпературном разложении [10]. Для измерения получаемых образцов проб использовали высокочувствительный радиометр альфа-бета-излучения Tri-Carb 3180 TR/SL [11].

Результаты. Для решения поставленной задачи нами были проведены радиационно-гигиенические исследования содержания трития в объектах окружающей среды и в зоне наблюдения двух идентичных АЭС, Балаковской и Калининской, эксплуатирующих по четыре реактора типа ВВЭР-1000. Отличительной особенностью Калининской АЭС является то, что с 2007 года на Калининской АЭС введен в эксплуатацию полигон глубинного захоронения жидких технологических сред с удельной активностью не превышающей 100 000 Бк/л. Полигон состоит из 17-ти скважин (5 нагнетательных, глубиной 1300 метров и 12 наблюдательных). Эксплуатация полигона глубинного захоронения осуществляется на основании лицензии на право пользования недрами (для строительства и эксплуатации подземных сооружений, не

связанных с добычей полезных ископаемых) от 18.05.2023 ТВЕ 014763 ЗЭ. Срок действия – по 01.01.33 года. На Балаковской АЭС жидкие технологические сред, с удельной активностью, не превышающей 100 000 Бк/л, сбрасываются в пруд охладитель.

При сравнении уровней сбросов и выбросов с этих АЭС, по их ежегодным отчетам видно, что Балаковская АЭС сбрасывает в год $0,27-2,6 \times 10^{11}$ Бк трития в год, а выбрасывает в воздушную среду $0,25-7,2 \times 10^{13}$ Бк в год трития [12], тогда как Калининская АЭС сбрасывает в год $8,6 \times 10^8$ Бк в трития год, а выбрасывает в воздушную среду $6,4 \times 10^{10}$ Бк в год трития [13]. Из этих данных видно, что с Балаковской АЭС на три порядка больше поступает трития во внешнюю среду, чем с Калининской АЭС.

Следует отметить, что до ввода в эксплуатацию в 2006 году [14] сбросы и выбросы трития на Калининской АЭС составляли $1,8 \times 10^{13}$ Бк в год, что сопоставимо с Балаковской АЭС. Пуск полигона глубинного захоронения жидких сред привел к тому, что содержания трития в пруде охладителе с 200 Бк/л в 2006 году снизилось до 5-10 Бк в 2022 году. Для оценки поступления этого радионуклида в окружающую среду были проведены сравнительные исследования по содержанию трития в воздухе, воде, растительности и в биопробах населения в зоне наблюдения этих АЭС. Полученные данные представлены в таблице.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что содержание трития в воздухе в зоне наблюдения Калининской АЭС почти на порядок ниже, чем таковой показатель на Балаковской АЭС. В воде и растительности содержания трития на обеих станциях существенно не различается. При этом содержание трития в организме населения, проживающего в зоне наблюдения Калининской АЭС почти в 2 раза ниже, чем у населения, проживающего в зоне наблюдения Балаковской АЭС.

Балаковская АЭС				
Населенный пункт (км от АЭС)	воздух (Бк/м ³)	вода (Бк/л)	растительность (Бк/кг)	моча (Бк/л)
Натальино (2)	0,6	2,0	31	53
Матвеевка (10)	0,1	2,3	41	115
Широкий Буерак (12)	4,8	3,5	39	127
Балаково (12)	0,4	2,7	42	90
М±б	2,1±1,9	2,3±0,7	31±8,1	44±41,1

Калининская АЭС				
Населенный пункт (км от АЭС)	воздух (Бк/м ³)	вода (Бк/л)	растительность (Бк/кг)	моча (Бк/л)
д.Ряд (3)	0,09	3,8	14	25
г.Удомля (4)	0,09	3,5	16	27
д.Песьево (5)	0,1	2,0	15	28
д.Еремково (14)	0,4	2,3	17	26
М±б	0,29±0,5	2,2±1,0	16±2,8	27±1,3

Вывод Глубинная изоляция жидких сред, содержащих тритий, способствует существенному снижению трития в воздухе зоны наблюдения АЭС и как следствие способствует его снижению в организме населения проживающего в этом районе.

Список литературы:

1. Reactor Database global Dashboard – World Nuclear Association. URL: <https://world-nuclear.org/nuclear-reactor-database/summary/> Сайт Всемирной ядерной организации (дата обращения: 05.03.2025)
2. Доклад НКДАР ООН «Источники и воздействие ионизирующего излучения», 2008 г. Приложение А / «UNSCEAR 2008 Report «Sources and effects of ionizing radiation». Volume I: SOURCES. Annex B.
3. О.А. Кочетков, П.П. Сурин, А.Ю. Максимов «Снижение выброса трития при эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах» //Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2024, вып. 2, с. 152—156.
4. Pearson R.J., Antoniazzi A.B., Nuttall W.J. Tritium supply and use: a key issue for the development of nuclear fusion energy // Fusion Engineering and Design. 2018. V. 136. P. 1140–1148.
5. Ивахнюк Г.К., Пименова М.А., Сай А.Р. Перспективы увеличения глобальной радиационной нагрузки от техногенного трития //XX Международная научно-практическая конференция по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций «Глобальная и национальные стратегии управления рисками катастроф и стихийных бедствий» Сборник трудов. М.: МЧС. 2015 С. 549-551.
6. МУК 4.3.047-2017 «Методика определения концентрации органических и неорганических соединений трития в воздухе окружающей среды и производственных помещений»
7. МУК 4.3.044-2012 «Методика определения объемной активности органических и неорганических соединений трития в

водных объектах методом жидкосцинтилляционной спектрометрии»

8. МУК 4.3.047-2019 «Методика определения удельной активности соединений трития в грунте и растительности»

9. МТ 1.2.1.15.002.0238-2014 «Выполнение измерений при радиационном контроле трития и углерода-14 в помещениях АЭС с применением расходомера-пробоотборника TASC-НТ-НТО-С14 (МВК)». Зарегистрировано в Федеральном информационном фонде по ОЕИ № Ф.1.40.2014.18213.

10. Руководство пользования прибором Pyrolyser-6 Trio.

11. Руководство пользования прибором Tri-Carb 3180 TR/SL

12. Отчет по экологической безопасности Балаковской АЭС с 2020 по 2024

13. Отчет по экологической безопасности Калининской АЭС с 2020 по 2024

14. Ежегодник НПО Тайфун «Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств» (с 2003 по 2022 гг.)

РАДИАЦИОННАЯ ПАТОЛОГИЯ ПОДЖЕЛУДОЧНОЙ ЖЕЛЕЗЫ ЧЕЛОВЕКА ПРИ ОСТРОМ АКЦИДЕНТАЛЬНОМ ОБЛУЧЕНИИ

Ю.Е. Квачева, Т.В. Пафомова, М.П. Семенова, В.А. Сухов
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва
tpafomova@fmbamail.ru

Актуальность. Патология поджелудочной железы при лучевых поражениях организма является предметом исследований радиационной панкреатологии. Первое экспериментальное сообщение по её морфологической проблематике увидело свет столетие назад [6]. В указанной пионерской работе М. Tsuzuki (1926 г.), как и в последующих публикациях зарубежных и отечественных авторов, основное внимание уделялось

гистологической характеристике островков Лангерганса. Те же акценты с преимущественной оценкой состояния эндокринной части органа сохраняются в последние годы в клинике лучевой терапии в связи с высокими рисками развития в отдалённом пострadiационном периоде сахарного диабета [3, 5]. Тем не менее вопросы его патогенеза так же, как и поиска эффективных радиозащитных средств, по-прежнему остаются предметом обсуждения [4]. В отсутствие целостной концепции немаловажными представляются сведения о морфофункциональных изменениях поджелудочной железы при остром аварийном облучении человека, в особенности в отношении оценки не только её островкового (эндокринного) компартмента, но и ацинарного (экзокринного) отдела. Это и стало **целью** настоящего исследования.

Материал и методы. Исследовали образцы поджелудочной железы, отобранные при аутопсиях 27 лиц, подвергшихся общему внешнему относительно равномерному гамма- / бета-облучению в результате аварии на Чернобыльской АЭС и погибших от острой лучевой болезни (ОЛБ) тяжёлой и крайне тяжёлой степени тяжести на 14-96-е сутки после радиационного воздействия (диапазон дозовых нагрузок составлял от 3,7 до 13,7 Гр). Для светоптической микроскопии материал фиксировали в 10% растворе нейтрального формалина и заливали в парафин. Срезы толщиной 3-4 мкм окрашивали гематоксилином и эозином. В целях идентификации В-клеток островков Лангерганса использовали окраску альдегид-фуксином по Гомори, А- и D-клеток – импрегнацию азотнокислым серебром по Гримелиусу и Халлестром-Хелльману соответственно. Для оценки синтезирующей функции экзокринной части поджелудочной железы применяли метод Пачини, выявляющий зимогенные гранулы. Ультратонкие срезы, полученные после фиксации образцов в 5% растворе глutarальдегида с последующей дофиксацией 1% раствором OsO_4 , контрастировали цитратом свинца и изучали в электронном микроскопе GEM-100B (Япония).

Результаты исследования. При морфофункциональном исследовании экзокринной части поджелудочной железы отмечали значительное количество диссоциировавших на отдельные клетки ацинусов. Во всех изученных наблюдениях ацинарная деструкция имела выраженный вариативный характер, объединяя варианты от небольшого разобщения отдельных клеток и / или клеточных

групп в пределах ацинуса до полной утраты морфологической очерченности внешнесекреторных функциональных единиц с выходом ациноцитов за их пределы. При этом на светооптическом и ультраструктурном уровнях не было выявлено некробиотических изменений ацинарных клеток. Сохранными оставались и их функции синтеза и секреции. Об этом свидетельствовали результаты окрашивания гистологических срезов поджелудочной железы по методу Пачини. Выявляемые при его применении зимогенные гранулы, содержащие панкреатические ферменты, секретировались клетками разрушенных ацинусов в межклеточное пространство с последующим всасыванием в лимфу и кровь.

Данная морфологическая картина соответствует описанному ранее при разных формах лучевой болезни (кроветворной, кишечной, церебральной) в эксперименте на крысах, собаках и обезьянах альтеративному (деструктивному) панкреатиту, сопровождаемому развитием ферментной токсемии [1]. В частности, у подопытных животных всех перечисленных биологических видов был прослежен отчётливый параллелизм между распространённостью процессов деструкции ацинусов и активностью α -амилазы в сыворотке крови. В этой связи, основываясь на морфологических данных настоящего исследования, с достаточной долей уверенности можно полагать, что повышение активности α -амилазы крови (в 10 раз и более), отмечавшееся у пострадавших в Чернобыльской катастрофе людей в первые дни после аварии, происходило не только за счёт поражения слюнных желёз (острый радиационный сиалоаденит), но и экзокринного отдела поджелудочной железы. Последствиями общей ферментной токсемии могут становиться такие потенциально опасные для жизни осложнения, как острый респираторный дистресс-синдром (диагностирован постмортально в 75% изученных наблюдений [2]), панкреатическая энцефалопатия, острая почечная недостаточность, шок и др.

Панкреатические секреты, поступившие в межклеточные пространства, как было установлено на светооптическом и ультраструктурном уровнях, оказывают также местное (тканевое) токсическое действие в отношении эндокринных островков. Обнаруживаемые при этом морфофункциональные изменения имеют последовательный характер. Прежде всего необходимо отметить

развитие периинсулярных отёков, в силу чего эндокринный отдел поджелудочной железы приобретал вид «плавающих островков». На этом фоне документировались начальные изменения части инсулоцитов: цитоплазма их выглядела разреженной, в отдельных эндокринных клетках ядра оказывались набухшими и увеличенными в размере, в других же, напротив, подвергались кариопикнозу. В случаях наступления смерти в самые ранние сроки после острого радиационного воздействия (до 20-х сут) в островках Лангерганса можно было видеть единичные делящиеся клетки, тогда как позднее пролиферирующие инсулоциты при микроскопическом исследовании рутинно окрашенных срезов поджелудочной железы не встречались.

При гистологической идентификации В-, А- и D-клеток островков Лангерганса общей закономерностью оказалась разбалансированность деятельности эндокриноцитов, вырабатывающих инсулин (В-клетки) и контринсулярные гормоны глюкагон и соматостатин (А- и D-клетки соответственно). У погибших в ранние сроки морфологически наблюдали признаки их синхронного высвобождения вышеперечисленными инсулоцитами. В свою очередь у пациентов с ОЛБ, скончавшихся позднее (после 30-х сут), эндокринные клетки-антагонисты демонстрировали синхронную заполненность цитоплазмы большим количеством крупных секреторных гранул. Однако при высокой насыщенности секретом многие из них обнаруживали неотчётливость клеточных границ. При электронной микроскопии она детализировалась лизисом («перевариванием») отдельных участков цитоплазматических мембран и наружных слоёв цитоплазмы инсулоцитов, в первую очередь, периферически локализованных В-клеток, продуцирующих инсулин. Такая картина свидетельствовала о развитии в указанные сроки функциональной несостоятельности островков Лангерганса (острая инсулярная недостаточность), что подтверждалось биохимически повышением в 4-6 раз концентрации глюкозы в крови. Наряду с высокой осмолярностью и гипонатриемией это может быть триггером таких жизнеугрожающих состояний, как гипергликемическая и гиперосмолярная кома, в свою очередь вызывающих отёк головного мозга, диагностированный в большинстве изученных аутопсийных наблюдений ОЛБ.

Выводы

1. С применением специальных гистологических окрасок и электронной микроскопии проведено исследование аутопсийных образцов поджелудочной железы людей, подвергшихся острому акцидентальному облучению в результате аварии на Чернобыльской АЭС.

2. Во всех изученных наблюдениях обнаружены морфофункциональные изменения в экзокринном и эндокринном отделах, соответственно идентифицированные как острый альтеративный панкреатит, сопровождаемый ферментной токсемией, и функциональная несостоятельность островкового аппарата, достигавшая максимального выражения (острая инсулярная недостаточность) у погибших спустя 30 и более дней.

3. В совокупности указанные морфофункциональные сдвиги могут приводить к развитию целого ряда жизнеугрожающих осложнений в ближнесрочной фазе острого радиационного поражения, становясь потенциальной основой для развития сахарного диабета в его отдалённом периоде.

Список литературы:

1. APUD и RAA системы регуляции при остром радиационном поражении / П. А. Власов, Ю. Е. Квачева, Е. Ю. Рабкина [и др.] // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2001. – Т. 41, № 1. – С. 16-19.

2. Квачева, Ю. Е. Глава 7. Радиационные поражения лёгких / Ю. Е. Квачева, А. А. Сперанская // Респираторная медицина : руководство: в 5 томах. Том 3. – 3-е изд., доп. и перераб. – Москва : ООО «ПУЛЬМОМЕДИА», 2024. – С. 714-733. – doi: 10.18093/978-5-6048754-7-6-2024-3-714-733

3. Diabetes mellitus after abdominal radiation therapy / C. Teinturier, M. F. Tournade, S. Caillat-Zucman [et al.] // Lancet. – 1995. – V. 346, № 8975. – P. 633-634. – doi: 10.1016/s0140-6736(95)91461-7.

4. New cellular interactions due to the radioprotective effect of N-Acetylcysteine in a model of radiation-induced pancreatitis / G. Demyashkin, M. Vadyukhin, V. Shchekin [et al.] // Int J Mol Sci. – 2025. – V. 26, № 11. - Article: 5238. – doi: 10.3390/ijms26115238.

5. Regional responses in radiation-induced normal tissue damage / D. C. Voshart, J. Wiedemann, P. van Luijk, L. Barazzuol // Cancers (Basel). – 2021. – V. 13, № 3. – Article: 367. – doi: 10.3390/cancers13030367.

6. Tsuzuki, M. Experimental studies on the biological action of hard Roentgen rays / M. Tsuzuki // Am. J. Roentgenol. – 1926. – V. 16. – P. 134-150.

УЧЁТ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ В СИСТЕМЕ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ, ОТРАСЛЕВЫЕ ПОДХОДЫ, МЕСТО И РОЛЬ В ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЕ

Я.В. Пител, Н.Л. Проскуракова
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И.Бурназяна ФМБА России г. Москва
varoslava.pitel01@gmail.com

Актуальность. Обеспечение ядерной и радиационной безопасности при использовании атомной энергии в мирных и оборонных целях, включая разработку, изготовление, испытание, транспортирование (перевозку), эксплуатацию, хранение, ликвидацию и утилизацию ядерного оружия и ядерных энергетических установок военного назначения, является одной из важнейших составляющих обеспечения национальной безопасности Российской Федерации.¹ Фундаментом безопасности служит нормирование и учёт доз облучения, реализуемый через четыре контура государственной статистической отчётности. Однако стремительное развитие ядерной медицины выявляет существенное методологическое расхождение между подходами, принятыми в атомной отрасли, и реалиями клинической практики: если на предприятиях атомной отрасли доза рассчитывается индивидуально, то в клинической практике она по-прежнему оценивается по усреднённым фантомным моделям, групповым методом. При этом медицинское облучение уже стало основным антропогенным источником радиационной нагрузки на популяцию. Методологические подходы, прошедшие многолетнюю апробацию в системе производственного дозиметрического контроля значительного масштаба, могут быть рассмотрены в качестве основы

¹ Указ Президента РФ от 13.10.2018 N 585 "Об утверждении Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу"

для совершенствования учёта доз в ядерной медицине - как в части персонализации дозиметрии пациентов, так и в части интеграции клинических платформ в структуру **Единой государственной системы контроля и учёта индивидуальных доз облучения граждан (ЕСКИД)** по аналогии с **Автоматизированной системой радиационного контроля (АСКРО)**.

Целью исследования является анализ методов учёта доз внешнего и внутреннего облучения персонала в разных производственных условиях предприятий атомной отрасли и форм статистической отчётности в связке с ЕСКИД для обоснования возможности адаптации отраслевых подходов в ядерную медицину, что создаёт научно-методическую основу для совершенствования учёта доз пациентов и повышения уровня радиационной безопасности при радионуклидной диагностике и терапии.

Материалы и методы. В работе использованы данные литературы, нормативно-правовые акты Российской Федерации и методические документы, регламентирующие учёт доз облучения персонала и населения².

Результаты. В настоящее время в атомной отрасли РФ выстроена сквозная вертикаль учёта: от первичных приборов (электронных дозиметров и счётчиков излучения человека) через отраслевую **Автоматизированную систему радиационного контроля (ОАСРКО)** - в федеральный банк ЕСКИД. Это обеспечивает своевременный мониторинг накопленных доз персонала, прослеживаемость измеряемых величин и преемственность данных при переходе работника между организациями.

Структура учёта доз облучения

Анализ исследований показал, что учёт доз облучения в Российской Федерации организован на основе трёх форм федерального статистического наблюдения, данные которых агрегируются в федеральном банке Единой системы контроля и учёта индивидуальных доз (ЕСКИД) [1]. Форма № 1-ДОЗ охватывает персонал группы А, форма № 2-ДОЗ - персонал группы Б и иные категории работников, форма № 3-ДОЗ - пациентов, подвергающихся медицинским процедурам с использованием

²Федеральный закон от 09.01.1996 N 3-ФЗ (ред. от 31.07.2025) "О радиационной безопасности населения"

источников ионизирующего излучения, форма №4 – население. Каждая из этих форм характеризуется собственным объектом учёта, особенностями методологии расчёта доз и целевым назначением собираемой информации. На предприятиях атомной отрасли Российской Федерации реализована сквозная цепочка передачи данных: от первичных приборов (электронных дозиметров, счётчиков излучения человека) через отраслевую автоматизированную систему (ОАСКРО) к формам № 1-ДОЗ и № 2-ДОЗ с последующей загрузкой в ЕСКИД. Такая организация позволяет обеспечить прослеживаемость измеряемых величин и сохранять дозовую историю работника при его переходе между предприятиями [3]. В медицинском контуре, данные которого отражаются в форме № 3-ДОЗ, аналогичная автоматизированная связь между дозиметрическими платформами лечебных учреждений и ЕСКИД в настоящее время не сформирована, что ограничивает возможности индивидуального прослеживания дозовых нагрузок пациентов.

Дифференциация подходов к учёту доз персонала

Форма № 1-ДОЗ аккумулирует данные инструментального индивидуального дозиметрического контроля персонала группы А. На предприятиях этот контур методологически проработан наиболее детально и охватывает несколько направлений: непрерывный оперативный контроль доз внешнего облучения с использованием термолюминесцентных и прямопоказывающих электронных дозиметров, интегрированных в АСКРО; контроль доз внутреннего облучения на счётчиках излучения человека и методами биофизического анализа для верификации поступления трансураниевых элементов, продуктов деления и активных нуклидов; учёт эквивалентных доз на хрусталик глаза и кожу кистей рук с применением кольцевых и налобных дозиметров; а также расчёт ожидаемой эффективной дозы за период в 50 лет при выведении работника из условий поступления радионуклида. Форма № 2-ДОЗ расширяет охват на персонал группы Б и лиц, чьё облучение связано с производственной деятельностью опосредованно. В данном контуре преобладают расчётные и групповые методы оценки доз - по данным контроля воздуха рабочей зоны и эпизодических измерений на счётчиках излучения человека, а периодичность регистрации может составлять квартал или год. Это формирует методологический

разрыв с формой № 1-ДОЗ по критериям точности и достоверности данных, поступающих в федеральный банк ЕСКИД.

Специфика учёта доз на предприятиях атомной отрасли

Сравнительный анализ дивизиональных практик позволил выделить три типа организации дозиметрического контроля, обусловленных характером радиационных факторов. В электроэнергетическом дивизионе (АЭС) реализован стандартизированный автоматизированный учёт [4] с ежесменной регистрацией доз, передачей данных в ОАСКРО и привязкой к контрольным уровням, установленным ниже законодательных пределов; доминирует внешнее гамма-облучение, внутреннее контролируется по Cs-137 и Co-60. На предприятиях ядерно-оружейного комплекса и топливного дивизиона приоритет отдан учёту доз от инкорпорированных альфа-излучателей (изотопы плутония, уран, америций) [5]; индивидуальная доза определяется на спектрометрах излучения человека и верифицируется по биообразцам, критическое значение имеет дозиметрия хрусталика и кожи вследствие контактного бета-облучения. В горнорудном дивизионе учёт основан на косвенных методах - измерении эквивалентной равновесной объёмной активности дочерних продуктов распада радона и торона в воздухе рабочей зоны и концентрации долгоживущих альфа-активных нуклидов в пыли, а индивидуальная доза рассчитывается на основе хронометража пребывания в конкретных производственных условиях.

Анализ учета доз облучения при медицинских процедурах

Анализ формы № 3-ДОЗ показал, что в её текущем виде она ориентирована преимущественно на сбор коллективных доз населения от медицинского облучения и не предназначена для клинических решений по ведению конкретного пациента [2]. Доза оценивается по усреднённым фантомным моделям для стандартных протоколов исследований (рентгенография, компьютерная томография, радионуклидная диагностика) без учёта индивидуальных анатомо-физиологических особенностей и реального распределения радиофармпрепарата в организме. При курсовой радионуклидной терапии накопленная за несколько циклов доза на критические органы (почки, костный мозг) не суммируется в индивидуальном регистре пациента, что создаёт риск субъективной оценки радиационной нагрузки.

Выводы. Сопоставление методологии производственного дозиметрического контроля с потребностями ядерной медицины позволило выделить несколько направлений потенциальной адаптации отраслевых подходов к задачам ядерной медицины, включающих: - персонализацию дозиметрии пациентов, предполагающая использование принципов индивидуального расчёта поглощённых доз по данным **однофотонной эмиссионной компьютерной томографии и компьютерной томографии**, аналогично пост-терапевтической дозиметрии персонала при инкорпорации радионуклидов; - интеграцию клинических дозиметрических платформ в структуру ЕСКИД по аналогии с ОАСКРО, что позволит суммировать дозовую нагрузку пациента за всю историю диагностических и терапевтических процедур; - внедрение категорий достоверности дозовой информации для ранжирования данных, поступающих в ЕСКИД из медицинского контура, по уровню точности: от инструментальной дозы до оценки по фантомной модели. Проведенное исследование предполагает создание научно-методической основы для совершенствования учёта доз пациентов и повышения уровня радиационной безопасности при радионуклидной диагностике и терапии.

Список литературы:

1. Бушманов, А.Ю. Единая система контроля и учёта индивидуальных доз облучения граждан: итоги функционирования и перспективы развития / А.Ю. Бушманов, В.Ю. Нугис, А.Р. Туков [и др.] // Медицинская радиология и радиационная безопасность. — 2020. — Т. 65, № 5. — С. 5–12.

2. Дозиметрическое обеспечение радионуклидной терапии: современное состояние и перспективы / Б.Я. Наркевич, А.В. Панкратов // Медицинская радиология и радиационная безопасность. — 2022. — Т. 67, № 4. — 27 с.

3. Итоги деятельности Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» за 2024 год. — Москва : Госкорпорация «Росатом», 2025. — URL: https://report.rosatom.ru/go/rosatom/go_rosatom_2024/rosatom_2024_ru.pdf (дата обращения: 27.07.2026). — 321 с.

4. Национальный доклад Российской Федерации о выполнении обязательств, вытекающих из Объединённой конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о

безопасности обращения с радиоактивными отходами (Третий национальный доклад). — Москва : Госкорпорация «Росатом», 2021. — 59 с, 69 с.

5. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2020/2021 Report to the General Assembly, with Scientific Annex D: Evaluation of occupational exposure to ionising radiation. — New York : United Nations, 2022. — Ch. VI. — 38 p.

6. Архипова В.И., Паринов О.В., Лягинская А.М., Метляев Е.Г., Максимова П.В.//Ильинские чтения 2026. Сборник материалов международного Научно-практического форума молодых ученых и специалистов. - Москва, 2026. - С. 57-59.

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕДИКО-САНИТАРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В СЛУЧАЕ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЙ НА ОБЪЕКТАХ И ТЕРРИТОРИЯХ, ОБСЛУЖИВАЕМЫХ ФМБА РОССИИ

*М.И. Грачев, Ю.А. Саленко, Г.П. Фролов, В.В. Барчуков
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, г. Москва,
usalenko@fmbcfmba.ru*

Актуальность. Современные угрозы и вызовы обуславливают необходимость совершенствования организации медико-санитарного обеспечения в случае радиационных аварий (РА).

Цель. Выделить ключевые проблемы противоаварийного планирования и аварийного медицинского реагирования медицинских организаций ФМБА России (далее – МО) с учетом различных сценариев развития аварийных ситуаций и их последствий, включая нарушения функционирования медицинской инфраструктуры и необходимость эвакуации МО.

Материалы и методы. Проведен анализ отечественного и международного опыта преодоления медико-санитарных последствий чрезвычайных ситуаций радиационного характера, применения современных концепций противоаварийного планирования и аварийного реагирования, результатов учений и тренировок с участием Аварийного медицинского радиационного

дозиметрического центра ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России.

Результаты. Исходные принципы медико-санитарного обеспечения предприятий атомной отрасли нашей страны были сформулированы и реализованы в конце 40-х, начале 50-х годов прошлого века. Отличительными особенностями этой фундаментальной и ресурсоёмкой части отечественного здравоохранения (ФМБА России) являлись:

1) максимальная доступность медицинского обслуживания для персонала радиационного объекта (РО) и членов их семей. Медицинские многопрофильные организации (медико-санитарные части) были размещены в городах и ЗАТО на относительно небольшом расстоянии от РО, как правило, не более 15 км (территориальный принцип);

2) приобретение опыта профилактики и лечения заболеваний осуществлялось с учетом вредных производственных факторов и специфики производства, чему способствовали гигиенические исследования и проведение санитарно-эпидемиологического надзора и контроля (производственный и комплексный принципы);

3) тесная связь между практической медициной и научными исследованиями, что позволило создать систему нормирования радиационного и других производственных факторов, изучить отдаленные последствия и риски для здоровья (принцип научного обоснования).

С точки зрения мирового опыта эта система отечественного здравоохранения является уникальной и не имеющей аналогов в странах с развитой атомной энергетикой. Проведенный анализ опыта преодоления медико-санитарных последствий чрезвычайных ситуаций радиационного характера позволил выявить в настоящее время ряд проблемных вопросов.

Так, разработанные ранее типовые проекты медико-санитарных частей не предусматривали технико-планировочных решений по созданию полноценных специализированных приемных отделений (СПО). В то же время СПО играют важнейшую роль начального звена госпитального этапа оказания медицинской помощи, выполняя не только функцию барьера распространения радиоактивного загрязнения в МО, но и местом проведения санитарной обработки,

медицинской сортировки пострадавших и оказания им медицинской помощи в экстренной и неотложной формах.

На наш взгляд, приемлемым решением данного проблемного вопроса является разработка и использование мобильных и легковозводимых модулей, предназначенных, в первую очередь, для проведения полной санитарной обработки пострадавших, включая лиц с комбинированными радиационными поражениями. Эти модули, соответствующие гигиеническим требованиям к материалам поверхностей, вентиляции, жизнеобеспечению, сбору и удалению жидких и твердых радиоактивных отходов, в необходимом количестве могут находиться на централизованном хранении, а в случае РА оперативно доставлены и развернуты в требуемом месте.

Развитие и создание современных автономных медицинских модулей можно отнести к самостоятельному направлению медицинских технологий, требующих развития и внедрения в практику, в том числе – с учетом современных угроз, связанных с нарушением или невозможностью функционирования медицинской инфраструктуры в результате боевых действий или в случае необходимости эвакуации МО [1].

По-прежнему, должно оставаться в сфере повышенного внимания кадровое и материально-техническое оснащение специализированных радиологических бригад (СРБ) территориального и федерального уровней, в том числе – выездных СРБ расширенного состава, включающих, помимо медицинского персонала, специалистов по оценке радиационной обстановки, дозиметрии ионизирующих излучений и др.

Чрезвычайно важным является вопрос, касающийся принятия всесторонне обоснованных и взвешенных решений по эвакуации МО в случае РА. Необходима разработка алгоритмов действий лиц, принимающих решение в данных ситуациях (в первую очередь, руководителей МО), на основании радиологических, ситуационных и медицинских критериев. Для принятия решений необходимо правильное понимание рисков (в том числе и фатальных) для здоровья и жизни нетранспортабельных больных в ходе подготовки и проведения эвакуации МО и рисков в результате их повышенного облучения.

Хорошо известна ситуация, когда в результате необоснованной (по радиологическим критериям) и недостаточно подготовленной эвакуации лечебно-профилактических учреждений в начальный период аварии на японской АЭС «Фукусима-1» (2011 г.) вследствие недостатков по медицинскому сопровождению при эвакуации погибло более 50 пациентов. Уже после эвакуации, в течение нескольких лет из-за психологического стресса по разным оценкам произошло более двух тысяч преждевременных смертей, в основном, среди эвакуированных людей пожилого возраста [2].

Приблизительные оценки показывают, что даже при тяжелой запроектной аварии на АЭС дозы облучения медицинского персонала и больных в МО (на расстоянии 10-15 км от АЭС, с учетом коэффициента ослабления и организации противорадиационной защиты) будут в несколько раз ниже референтного значения прогнозируемой остаточной дозы для обязательной эвакуации населения [3].

В случае же принятия решения об эвакуации населения города, как правило, имеется достаточный запас времени (7 суток и более) для подготовки больных к эвакуации, находящихся в МО. Учитывая, что медико-санитарные части и клинические больницы ФМБА России, обслуживающие РО I-й категории потенциальной радиационной опасности (ОСПОРБ-99/2010), находятся в зоне планирования защитных мероприятий, рассматриваемый выше вопрос должен найти отражение в плане медико-санитарного обеспечения персонала и населения в случае РА. При этом целесообразно определить значения дозы, при которой эвакуация нетранспортабельных больных неизбежна. В последнем случае потребуются не только организационные, но и технические решения, связанные с выделением специально оборудованных транспортных средств (реанемобили) и медицинского оборудования.

Участие ФМБА России в общей системе медико-санитарного обеспечения в случае РА на обслуживаемых территориях определяется функциями регулятора по обеспечению радиационной безопасности персонала РО и участников аварийно-восстановительных работ. В этом качестве наиболее сложным является круг задач в начальном периоде аварии (ранняя фаза). Допуск персонала к аварийным работам осуществляется, как правило, из условий непревышения 50 мЗв/год с учетом

минимизации коллективной дозы и времени выполнения необходимых операций.

Допуск к планируемому повышенному облучению в соответствии с НРБ-99/2009 не должен являться формальной процедурой и требует оперативного рассмотрения территориальным органом ФМБА России документально оформленного обоснования. Для принятия решений по защитным мерам в отношении населения также необходимо согласование со стороны санитарно-эпидемиологической службы ФМБА России. По опыту имевших место РА, исходная информация, необходимая для оперативного прогноза радиационной обстановки (результаты оценок выброса радионуклидов, метеорологические данные и др.), зачастую является неполной и поступает с задержкой по времени. Поэтому основное значение для принятия соответствующих решений будут иметь результаты радиационного мониторинга. Следует отметить, что работа радиологических бригад (групп) центров гигиены и эпидемиологии ФМБА России при выполнении этих задач может проходить в условиях повышенного радиационного риска, что потребует ограничения времени проведения измерений при сохранении их достаточности для получения достоверных оценок [4].

Выводы

1. Основой для разработки плана медико-санитарного обеспечения персонала и населения в случае РА, расчета необходимых сил и средств для аварийного медицинского реагирования является оценка категории потенциальной радиационной опасности предприятия. При этом необходимо учитывать различные сценарии развития РА, возможные нарушения в функционировании территориальной медицинской инфраструктуры, включая необходимость проведения эвакуации МО. В любом случае эвакуация, как мера защиты при РА, не может рассматриваться как экстренная процедура в отличие, например, от химической аварии, и требует обоснования и оптимизации в части объемов и сроков выполнения подготовительных мероприятий для снижения всевозможных рисков.

2. Приоритетным направлением развития системы медико-санитарного обеспечения ФМБА России является использование мобильных медицинских комплексов различного назначения, включая медицинские модули, передвижные лаборатории, средства

дистанционного проведения радиационного мониторинга, а также модернизация приемных и профильных отделений МО ФМБА России для обеспечения профилактических режимов ведения больных.

3. При решении вопросов нормативно-правового и методического регулирования целесообразно совершенствовать оперативное управление в цифровом формате с учетом межведомственного взаимодействия на территориальном и федеральном уровнях, уделив особое внимание оперативности верификации диагнозов и дозиметрической информации о пострадавших, включая своевременную передачу информации от предприятия (РО) в территориальный орган ФМБА России, а также проработке алгоритмов и унифицированных методов радиационного мониторинга в зоне ответственности.

Список литературы:

1. Удалов Ю.Д., Гончаров С.Ф., Грачев М.И., Саленко Ю.А., Фролов Г.П. и др. Бригады скорой медицинской помощи при лечебно-эвакуационном обеспечении в условиях воздействия радиационного фактора // Медицина катастроф. 2025. №3. С. 88-94.

2. The Fukushima Daiichi Accident. – Vienna: IAEA, 2015. – 196 p.

3. Серия норм безопасности МАГАТЭ, № GSR PART 7. Готовность и реагирование в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации. Общие требования безопасности. – Вена: МАГАТЭ, 2016. – 120 с.

4. Грачев М.И., Талдытов С.В., Шейно И.Н., Карл Л.Э., Цовьянов А.Г., Крючков В.П. Некоторые подходы к обоснованию доминирующей сети пунктов мониторинга радиационной обстановки в случае аварийной ситуации // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2026. – Т. 71. – № 3. – С. 34-41.

ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА АКТИВНОСТИ ИНКОРПОРИРОВАННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ ПРИ РАНЕВОМ ПОСТУПЛЕНИИ

П.П. Ганцовский, А.Ю. Комаров, Е.А. Корнева
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, г. Москва,
[*jane.korneva@gmail.com*](mailto:jane.korneva@gmail.com)

В ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России рассмотрен случай острого поступления радиоактивных веществ в организм человека через рваную рану в области ладони, нанесенной электроинструментом. В подобных случаях возникает необходимость безотлагательной оценки уровня поступившей активности и проведения неотложных хирургических и терапевтических мероприятий [1, 2]. В статье представлены результаты проведенных исследований и оценок активности инкорпорированных радионуклидов.

Актуальность. С учетом уникальности случая данного раневого поступления применен специфический комплекс методов оценки активности, учитывающий глубину и большой размер раны, высокое содержание активности и транспортабельность радионуклидов в организм. Представленные в статье методы могут быть использованы при оценках уровней раневого поступления радионуклидов научными и клиническими учреждениями, центрами гигиены и эпидемиологии ФМБА России, а также службами радиационной безопасности предприятий.

Цели. Основной целью работы являлась оценка поступившей активности в различных органах и тканях.

Материалы и методы. Первостепенно решалась задача оценки активности ^{241}Am в ладони пострадавшего. Измерения проводились на гамма-спектрометре с полупроводниковым детектором из особо чистого германия (пр-во Mirion Technologies (Canberra), Inc., США). Для уменьшения неопределенности результата измерения кисть при всех измерениях позиционировалась на расстоянии не менее 80 мм от поверхности детектора. Калибровка спектрометра выполнялась с помощью образцового источника типа ОСГИ с учетом эффективной глубины расположения радиоактивного вещества. Для определения

эффективной глубины расположения радиоактивного вещества измерения проводились с внутренней и внешней стороны кисти, а также по разнице ослабления характеристического излучения плутония и линии 59,5 кэВ ^{241}Am . Измерение эффективной глубины расположения радиоактивного вещества также важно для последующей оценки уровней и скорости резорбции радионуклидов [3].

При первичном иссечении мягких тканей отбирались образцы для исследования радионуклидного состава. Дополнительно на анализ собрали тампоны с кровью из раны. Для более точного анализа, иссеченный материал и образцы тампонов с кровью из раны направили на альфа-спектрометрическое исследование.

Для более точного иссечения тканей решалась задача исследования неоднородности содержания активности изотопа ^{241}Am в руке пострадавшего. В различных точках кисти в области ранения проведены измерения низкоэнергетического фотонного излучения: характеристического излучения изотопов плутония и гамма-излучения ^{241}Am .

Для оперативного количественного анализа активности, удаленной из раневой поверхности, применялся сцинтилляционный гамма-спектрометр. Измерения проводились до начала операции, несколько раз в процессе удаления загрязненных тканей и по окончании операции.

В связи с возможным поступлением радионуклидов из раны во внутренние органы производились измерения активности в ^{241}Am критических органах. Калибровка по эффективности при измерении активности ^{241}Am в печени произведена с помощью антропоморфного фантома. В ячейках, относящихся к области расположения печени, были размещены источники ^{241}Am , изготовленные при помощи образцовых растворов.

Вследствие фагоцитоза коллоидов радионуклиды могут задерживаться в лимфатических узлах [4]. В связи с этим проведены измерения в области расположения локтевого и подмышечного лимфоузлов с помощью гамма-спектрометра.

Результаты. При определенном значении эффективной глубины загрязнения равном 1,7 см со стороны ладони результат измерения активности ^{241}Am в кисти составил до проведения иссечений $11,0 \pm 0,9$ кБк и $6,7 \pm 0,7$ кБк после.

В результате измерений до иссечений получено распределение значения активности на единицу площади в кисти пострадавшего (Рис. 1а).



Рисунок 1а - Распределение значения активности на единицу площади в кисти

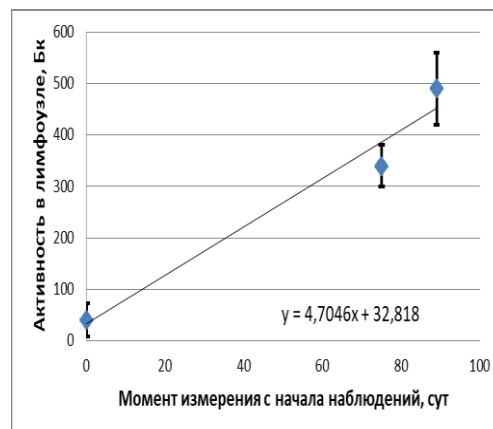


Рисунок 16 – Динамика содержания активности ^{241}Am в подмышечном лимфоузле

При интраоперационных измерениях было выявлено и удалено более 15 загрязненных участков тканей, с сохранением двигательных функций кисти. Определено снижение общей активности ^{241}Am на $45 \pm 10 \%$. За весь период наблюдений измеряемая активность ^{241}Am в печени пострадавшего на ППД спектрометре не превысила 40 Бк. В подмышечном лимфоузле обнаружен ^{241}Am . По трем измерениям построена линейная зависимость накопления активности в лимфоузле и рассчитана скорость накопления равная $4,7 \pm 1,5$ Бк/сут по ^{241}Am (рис. 16). Суммарная активность по ^{241}Am удаленных материалов согласуется с уменьшением активности в руке, определенным при прямых измерениях во время операции. Полученные результаты показали одинаковое соотношение изотопов плутония и америция в различных образцах мягких тканей и крови. Получено, что доля ^{241}Am составляет $3,4 \pm 0,3 \%$ от суммарной активности альфа-излучающих радионуклидов, представленных изотопами плутония. С учетом этого определенная суммарная активность альфа-излучающих радионуклидов плутония и ^{241}Am после всех иссечений составила 190 ± 20 кБк.

Выводы. В процессе проведения иссечений удалено максимально возможный объем тканей, загрязненных изотопами ^{241}Am и

плутония. Однако большая часть активности до сих пор содержится в кисти пострадавшего, т.к. дальнейшее иссечение привело бы к нарушению функции кисти. Лабораторные исследования собранного материала подтвердили оценки удаленной из раны активности с учетом неопределённости, что говорит о достоверности полученных результатов и релевантности примененных методов измерений в подобных случаях раневых поступлений.

Список литературы:

1. Л. Г. Важин В. Ф. Хохряков В. Л. Шевкупов. Раны и ожоги кожи, загрязненные α -излучателями, у персонала радиохимического предприятия // Гигиена и санитария. 1994. №9.
2. ISO 20031:2020. Радиологическая защита — Мониторинг и дозиметрия внутреннего облучения вследствие загрязнения ран радионуклидами ISO 20031:2020
3. Беляев И. К., Жорова Е. С., Калистратова В. С., Нисимов П. Г., Парфенова И. М., Тищенко Г. С., Яценко В. Н. Радиоактивные вещества и колотые раны // Экстремальная биомедицина. 2011. №1 (35).
4. Краснюк В. И., Гастева Г. Н., Блинов А. П., Кузьменко Л. Г. Неотложная помощь при остром раневом поступлении внутрь плутония и америция (случай из практики) // Мед. труда и пром. экол. 2005. №3.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЛЕЧЕНИИ МЕСТНЫХ ЛУЧЕВЫХ ПОРАЖЕНИЙ: ОПЫТ ФГБУ ГНЦ ФМБЦ ИМ. А.И. БУРНАЗЯНА ФМБА РОССИИ

*Т.А. Астрелина, В.А. Брунчуков, Ю.Б. Сучкова, В.А. Никитина,
О.Г. Михадаркина
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва
t_astrelina@mail.ru*

Актуальность. Одним из наиболее распространенных видов радиационных повреждений при воздействии ионизирующего излучения на человека являются радиационные ожоги - тяжелые

местные лучевые поражения (МЛП). МЛП кожи часто встречаются при радиационных авариях и инцидентах с источниками ионизирующих излучений.

Согласно проведенным многочисленным исследованиям, изменения кожи вследствие радиационного поражения в ранний период возникают из-за генетических повреждений стволовых и пролиферирующих клеток эпидермиса вследствие снижения репаративных процессов. Развитие радиационно-индуцированного фиброза связано с клеточными и молекулярными механизмами и сопровождается высокой выработкой и отложением белков внеклеточного матрикса, хронической воспалительной реакцией с привлечением иммунных клеток к пораженному участку, что приводит к усилению местного воспаления и развитию фиброза [3]. Важное значение имеет и повреждение менее радиочувствительных клеточных и тканевых элементов: эндотелия сосудов, фибробластов, эластичной и гладкомышечной оболочек.

МЛП - это специфическое радиационное повреждение кожи, других подлежащих тканей и структур, включая внутренние органы, которые находятся в проекции действия пучка глубоко проникающего ионизирующего излучения на тело, особенностью которых является отсутствие заживления поражённой поверхности.

МЛП развиваются у пациентов, облученных дозами более 8 Гр, и очень трудно поддаются лечению. Консервативные методы лечения незаживающих хронических локальных радиационных ожогов неэффективны, а образование патологических рубцов и контрактур, язв значительно затягивает весь процесс лечения, ухудшает результаты лечения и качество жизни пациентов.

Характерной особенностью клинического течения МЛП является большая вероятность появления поздних лучевых осложнений, развивающихся спустя 6 и более месяцев после периода видимого восстановления.

МЛП очень трудно поддаются лечению, консервативные методы лечения незаживающих хронических лучевых язв являются малоэффективными, и нередко требуется хирургическое вмешательство, которое не всегда возможно из-за состояния организма. Одним из перспективных методов в лечении локальных радиационных ожогов является применение биомедицинских технологий в комплексной терапии для сокращения времени

заживления язвенных дефектов и улучшения качества жизни пациентов.

В связи этим разработка новых способов усовершенствования комплексного консервативного лечения МЛП кожных покровов для улучшения результатов реконструктивно-восстановительного лечения пациентов является важной задачей современной медицины.

Цель. Продemonстрировать новые технологии в лечении местных лучевых поражений для повышения эффективности комплексной терапии в ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им А.И. Бурназяна ФМБА России.

Материалы и методы. Представлены перспективные методы лечения МЛП применения клеточной терапии, тканеинженерных конструкций (ТИК), способных восстанавливать, замещать или поддерживать функцию поврежденных тканей, использование которых в клинической практике в комплексной терапии МЛП позволяет сократить сроки заживления язвенных дефектов и повысить качество жизни пациентов. Для клеточной терапии используются биомедицинские клеточные продукты (БМКП), в частности мезенхимальные стромальные клетки (МСК) из различных источников [2]; аутологичные минимально манипулированные продукты стромально-васкулярная фракция (СВФ) жировой ткани; паракринные факторы, полученные из культивированных стволовых клеток и др. [1,4].

Результаты. Успешное применение МСК в комплексной терапии радиационных ожогов, обусловлено в основном их секреторной активностью, связанной с выработкой ими широкого спектра цитокинов и ростовых факторов. Помимо этого, МСК обладают иммуносупрессивным, противовоспалительным и трофическим действием. Эффективность применения МСК и кондиционных сред, полученных при их культивировании продемонстрирована при лечении МЛП в эксперименте, вызванных рентгеновским излучением [1,2,4].

В настоящее время активно применяется жировая ткань (подкожная жировая клетчатка) в пластической хирургии и клинической практике для лечения дефектов костей и объема мягких тканей, заболеваний опорно-двигательного аппарата и др. Эффект действия стромально-васкулярной фракции (СВФ) жировой ткани

(ЖТ) реализуется за счет дифференцировки их в различные направления и замещения поврежденных участков тканей, выработки паракринных факторов, обеспечивающих иммуномодулирующий эффект, предотвращение клеточной гибели по механизму апоптоза, неоангиогенеза, ремоделирование фиброзной и соединительной тканей. Исследования на лабораторных животных показали, что применение СВФ жировой ткани улучшает течение МЛП кожи, ускоряет процессы заживления ран за счет улучшения неоангиогенеза и усиления пролиферации фибробластов после локального рентгеновского облучения в эксперименте [2,5]. Все это указывает на возможность успешного применения клеток жировой ткани при тяжелых местных радиационных поражениях.

Применение ТИК - биологических аллотрансплантатов (многослойного обезвоженного биологического покрытия, гидрогелей и др.), полученных из тканей плаценты человека показало эффективность при лечении МЛП, химических, термических ожогах, способствовало ускоренному заживлению, регенерации, ангиогенезу, восстановлению функции тканей, минимизации воспалительной реакции и патологического рубцевания, контрактур, обеспечивает барьерную, антимикробную, регенеративную и защитную функцию ран, воспроизводить тканеспецифическое микроокружение [5,6,7].

Выводы. Проведенные исследования демонстрируют важную роль применения биомедицинских технологий, включая клеточные и ТИК, в комплексном лечении МЛП. Наиболее перспективным для клинического применения представляются комбинированное применение ТИК и аутологичных клеток (МСК, СВФ), обладающих способностью к дифференцировке в различных направлениях секреции цитокинов и факторов роста, играющих важную роль в регенерации ткани. Многочисленными исследованиями продемонстрирована высокая эффективность и безопасность применения биомедицинских технологий при лечении тяжелых МЛП, обеспечивающая благоприятные условия для повышения эффективности терапии, сокращения сроков заживления раны, регуляции и активации иммунных и репаративных процессов в дерме, полного восстановления поврежденной сосудистой сети и утраченных кожных покров без грубых рубцовых изменений, достижения

удовлетворительного косметического и функционального результата, достойного качества жизни пациентов.

Список литературы:

1. Brunchukov Vitaliy, Tatiana Astrelina, Daria Usupzhanova, Anna Rastorgueva, Irina Kobzeva, et al. Evaluation of the effectiveness of mesenchymal stem cells of the placenta and their conditioned medium in local radiation injuries. Cells 2020, 9(12), 2558; <https://doi.org/10.3390/cells9122558>; doi:10.3390/cells9122558

2. Yu. B. Deshevoi, T. A. Nasonova, O. A. Dobrynina, R. V. Deevb, V. G. Lebedev, A. V. Lyrshhikova, T.A. Astrelina, B. B. Moroz Experience of Application of Syngeneic Multipotent Mesenchymal Stem Cells (MMSCs) of Adipose Tissue for Treatment of Severe Radiation Skin Lesions at Various Intervals after Exposure in the Experiment // Biology Bulletin, 2020, Vol. 47, No. 11, pp. 1552–1557. 10.1134/S1062359020110060.

3. Jimenez-Socha M., Dion G.R., Mora-Navarro C., et al. Radiation-Induced Fibrosis in Head and Neck Cancer: Challenges and Future Therapeutic Strategies for Vocal Fold Treatments. Cancers. 2025.- 17, 1108. <https://doi.org/10.3390/cancers17071108>

4. Брунчуков В.А., Т.А. Астрелина, В.А. Никитина и др. Экспериментальное лечение местных лучевых поражений мезенхимальными стволовыми клетками и их кондиционной средой. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020. Том 65. № 1, с.5-12. DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-1-5-12

5. Дешевой Ю.Б., Лебедев В.Г., Насонова Т.А., Добрынина О.А., Брунчуков В.А. и др. Лечение тяжелых местных лучевых поражений у крыс путем применения тканеинженерной матрицы с трансплантацией сингенных клеток стромально-васкулярной фракции (свф) жировой ткани и лекарственной терапией // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2026. Т. 71. № 3. С. 5–10. DOI:10.33266/1024-6177-2026-71-3-5-10.

6. Меркулов М.В., Астрелина Т.А., Усупжанова Д.Ю., Брунчуков В.А. и др. Оценка применения препарата модифицированного гидрогеля при лечении местных лучевых поражений кожи у лабораторных животных // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2025. Т. 70. № 4. С. 33–38. DOI:10.33266/1024-6177-2025-70-4-33-38.

7. Расторгуева А.А., Астрелина Т.А., Брунчуков В.А. и др. Оценка эффективности применения децеллюляризованной амниотической

мембраны человека в комбинации с клеточной терапией при местных лучевых поражениях // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2024. Т. 69. № 3. С. 5–12. DOI:10.33266/1024-6177-2024-69-3-5-12.

ГИГИЕНИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ И МЕХАНИЗМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛА НА ОБЪЕКТАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

А.Е. Колышкин

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

Kolyshkin.ae@mail.ru

Актуальность: Актуальность исследований обусловлена необходимостью дальнейшей системной интеграции технических и гигиенических критериев и принципов обеспечения безопасности персонала перспективных реакторных установок.

Цель: Совершенствование структуры и содержания системы гигиенического обеспечения создания перспективных реакторных установок на основе исторического опыта научного обоснования гигиенических принципов обеспечения безопасности персонала при реализации Атомного проекта СССР.

Материалы и методы: Проведен комплексный ситуационный анализ проблемных вопросов гигиенического обеспечения стадий жизненного цикла реакторных установок и технологий ядерного топливного цикла.

Результаты: На всех этапах развития атомной энергетики и промышленности учеными отечественной гигиенической и физической школы разрабатывалась и внедрялась система гигиенических принципов и механизмов обеспечения безопасности персонала, ставшая базовой основой гигиены труда в атомной отрасли. В ее основу входили [1, 2, 3]:

1) Защита временем, расстоянием, экранами (Г.М. Франк, А.А. Летавет, Н.Г. Гусев, У.Я. Маргулис, Ю.М. Штукенберг);

2) Трёхзональная планировка, статические и динамические гигиенические барьеры безопасности, контролируемая зона, системная гигиеническая оценка технологического процесса и технологических операций (Л.А. Ильин, Ф.Г. Кротоков, С.М. Городинский, Н.Ю. Тарасенко, Г.М. Пархоменко, О.С. Андреева, М.А. Ходырева, Г.И. Гнеушева, В.П. Гранильщикова, А.В. Быховский, М.В. Алферов, З.Г. Батова, Ф.Д. Третьяков, Е.Д. Тальянский, М.С. Егорова, В.С. Калистратова);

3) Контрольные уровни (И.Б. Кеирим - Маркус, В.Т. Хрущ, В.И. Бадьин);

4) Гигиеническая оценка проектных решений (Н.П. Саяпин, Р.Я. Саяпина);

5) Гигиеническая организация трудового процесса, функциональная надежность персонала (Г.М. Пархоменко, В.В. Копаев, А.Н. Мусаткова).

Динамика разработки и внедрения принципов и механизмов радиационной гигиены труда в атомной отрасли представлена на *рисунке 1*.

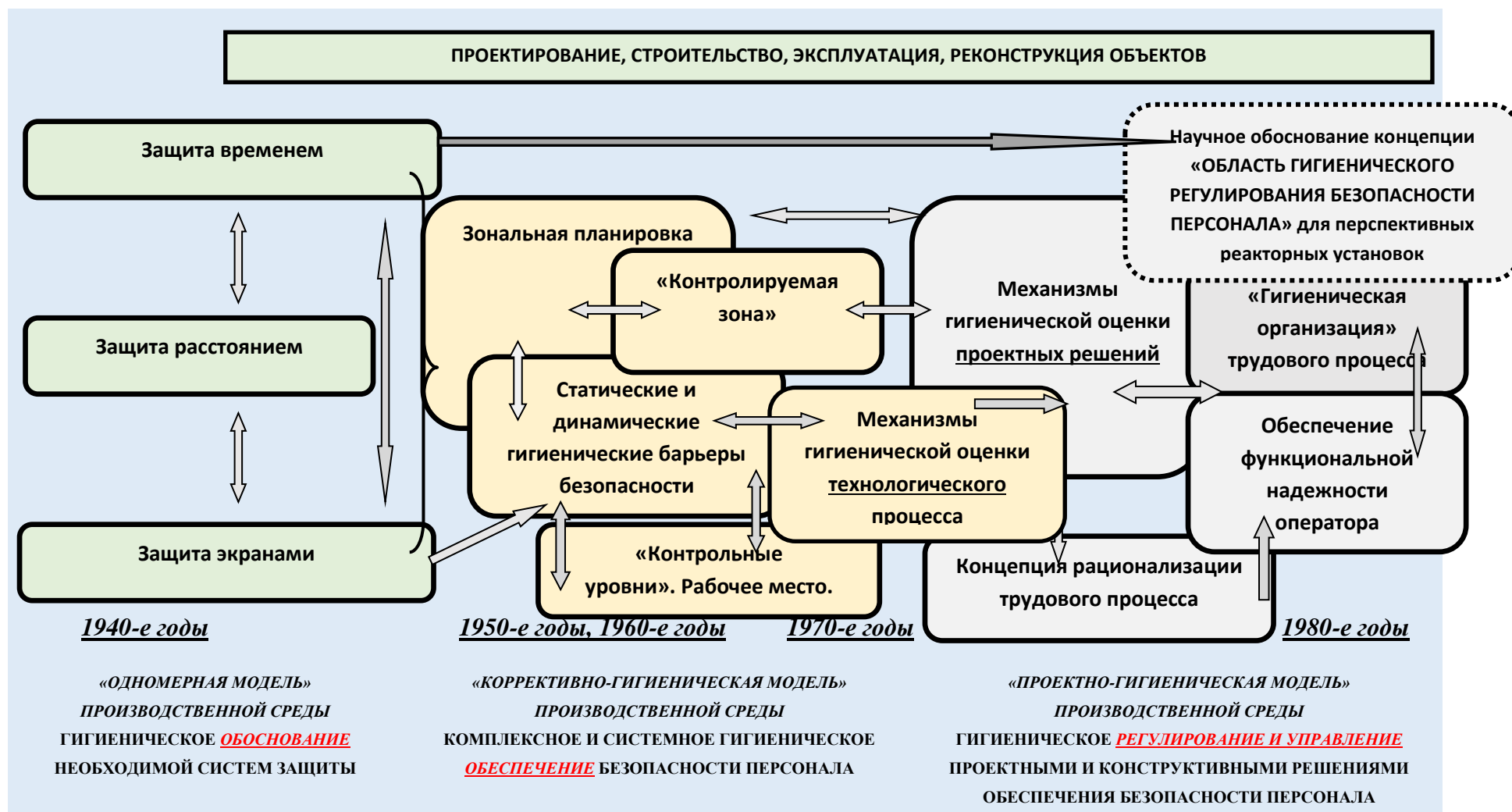


Рисунок 1 Общая структурно-функциональная взаимосвязь базовых принципов и механизмов в области гигиены труда персонала при реализации Атомного проекта в СССР.

На начальном этапе развития атомной промышленности в 1940-1950-е годы в системе гигиенического обеспечения безопасности персонала преобладала «одномерная модель» оценки условий труда персонала, рассматривающая воздействие отдельных факторов физической и химической природы на персонал.

Разработанная в дальнейшем «коррективно-гигиеническая модель» оценки условий труда персонала, предусматривает оценку условий труда персонала при сочетанном и комбинированном воздействии нескольких вредных и (или) опасных факторов физической и химической природы. Данная модель легла в основу обоснования принципов трёхзональной планировки, системы стационарных и динамических гигиенических барьеров безопасности, обоснования контролируемой зоны и установления контрольных уровней воздействия факторов производственной среды на работников.

«Проектно-гигиеническая» модель оценки условий труда персонала перспективных реакторных установок предусматривает, прежде всего, гигиенические исследования проектных и конструктивных решений, систем технического обеспечения и обоснования ядерной и радиационной безопасности, прогнозируемых условий эксплуатации объектов использования атомной энергии и производственных процессов. Процедуры гигиенической оценки проектных решений сформированы, в том числе, на основе анализа возможных последствий аварий и оценки проектных решений по защите персонала «временем, расстоянием, экранами».

Действующие в настоящее время механизмы технического обеспечения ядерной и радиационной безопасности установок разработаны с учетом и по результатам всестороннего гигиенического исследования условий труда персонала при нормальной эксплуатации и аварийных ситуациях (рис. 2).

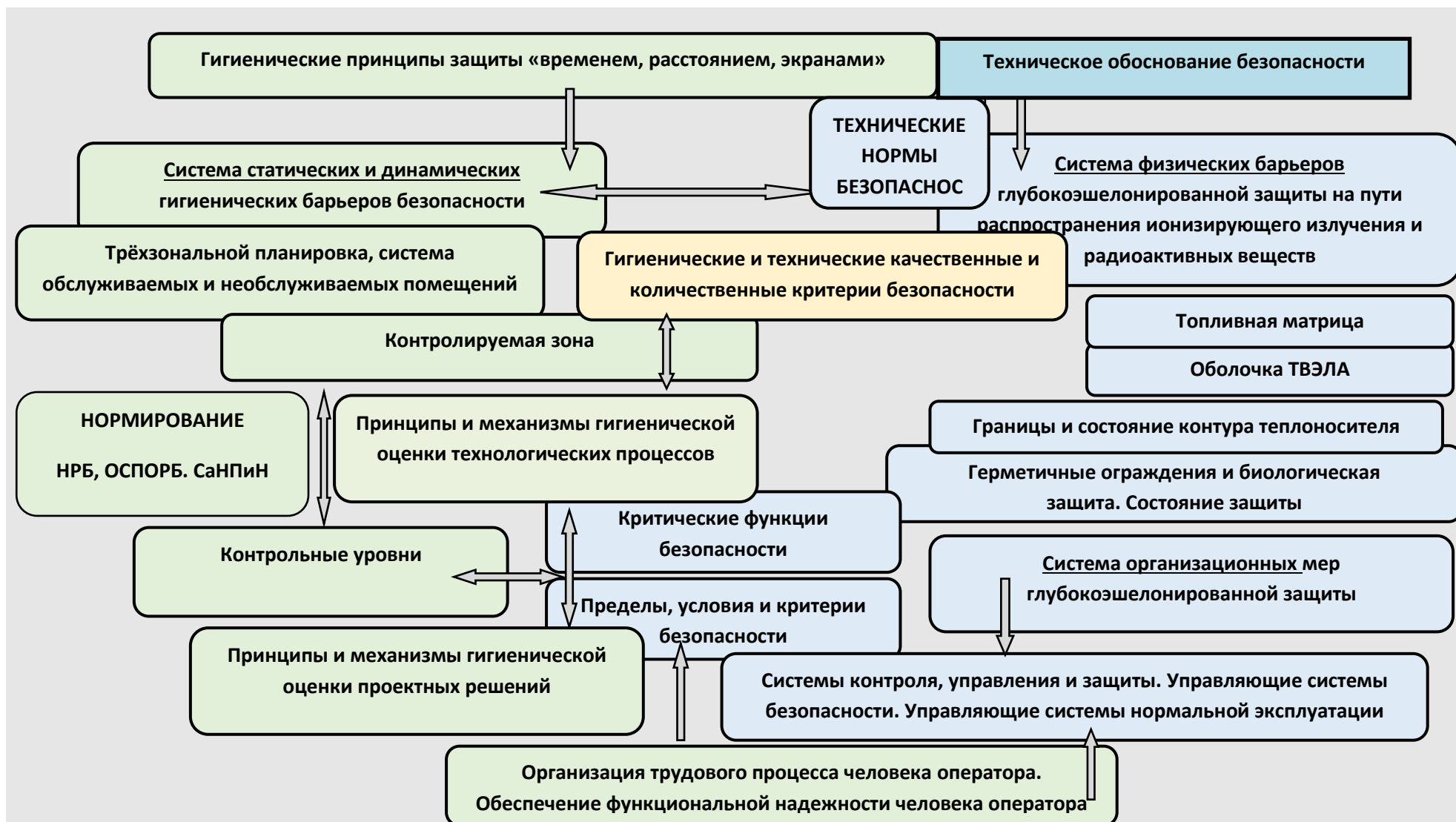


Рисунок – 2. Взаимосвязь гигиенических принципов и механизмов обеспечения безопасности персонала и технических принципов и барьеров безопасности на объектах использования атомной энергии

Концепции статических и динамических гигиенических барьеров безопасности и трехзональной планировки полностью коррелируют по своему «внутреннему» содержанию с идеологией «физических барьеров безопасности» ядерных установок в системе технического обеспечения ядерной и радиационной безопасности [4]. Гигиеническим критерием состояния технических барьеров безопасности являются контрольные уровни контролируемых параметров.

Процедуры гигиенической оценки напряженности функционального состояния оперативного персонала в процессе труда являются важнейшей составляющей надежности и эффективности управляющих систем безопасности объектов.

Выводы: Проектно-гигиеническая модель оценки и прогнозирования условий труда персонала при различных режимах эксплуатации перспективных реакторных установок является основой для гигиенической экспертизы структуры и содержания технического обоснования ядерной и радиационной безопасности на стадии разработки технического проекта данных установок.

Список литературы:

1. Радиационная гигиена. Том 1. Гигиена труда. //Редакторы тома: С.М. Городинский, Г.М. Пархоменко, Н.Ю. Тарасенко. //Государственное издательство медицинской литературы «МЕДГИЗ» – 1962 – Москва. 232 стр.

3. Пархоменко, Г. М. Организация трудовых процессов при работе с радиоактивными веществами / Г.М. Пархоменко, В.В. Копаев, А.Н. Мусаткова. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 103 с.

4. Гордон, Б. Г. Идеология безопасности. Труды НТЦ ЯРБ / Б.Г. Гордон. – Москва: [б.и.], 2006. – 236 с.

КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ В ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАЦИОНАРНОЙ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ЭНДОВАСКУЛЯРНЫХ ХИРУРГОВ

В.А. Сухов^{1,2,3}, А. Лантух³, Д.В. Щербаков¹, М.С. Мотин²

*1 - ФГАОУ ВО Первый МГМУ им. И.М. Сеченова Минздрава России
(Сеченовский Университет), Москва*

2 - ФГБУ ГНЦ ФМБЦ ИМ. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва

3 - ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ», Москва,

suxowv@gmail.com

Актуальность. Персонал ангиографических рентгенооперационных подвергается профессиональному облучению, основным источником которого является рассеянное излучение от пациента. При проведении эндоваскулярных вмешательств персонал может получать значительные дозовые нагрузки, особенно при сложных и длительных процедурах [2,4].

Традиционная процедура группового дозиметрического контроля предполагает расчёт эффективной дозы на основе измерений МАЭД с учётом рабочей нагрузки аппарата. Однако расчёт эффективной дозы усредняет нагрузку по всему телу, маскируя переоблучение отдельных органов и частей тела. Абсолютные значения МАЭД сильно зависят от режима работы аппарата (анодный ток, анодное напряжение, выбранный протокол), что делает их нестабильным индикатором эффективности защиты [1].

В последние годы для анализа больших массивов данных всё чаще применяются методы многомерной статистики [3,5]. Кластерный анализ позволяет сгруппировать операционные, типы процедур или категории персонала по уровню риска, что помогает выявить «слабые места» в существующей системе защиты. Этот подход гораздо информативнее изолированного анализа отдельных дозиметрических данных, так как позволяет оценивать безопасность комплексно, выявляя скрытые закономерности, неочевидные при традиционном анализе.

Цель. Разработать и апробировать метод выявления дефектов радиационной защиты на рабочих местах эндоваскулярных хирургов на основе метода кластеризации.

Материалы и методы. Исследование выполнено в 10 клинических больницах г. Москвы. Объектами исследования явились 19 рабочих мест эндоваскулярных хирургов внутри рентгеноперационных. В обследованных кабинетах используется стационарная защита в виде ширмы со свинцовым эквивалентом 0,5 мм Pb, установленной между рабочим местом врача и пациентом.

В каждом кабинете измерения МАЭД выполнены на четырёх уровнях от уровня пола: 30 см, 80 см, 120 см, 160 см. Измерения проводились дозиметром ДКС-АТ1123.

Для корректного сравнения абсолютных значений МАЭД между кабинетами все значения были нормированы на ток ($МАЭД_{норм} = МАЭД_{изм} / МА$), что позволило исключить влияние вариабельности режимов экспозиции.

Рассчитывались индексы вертикальной неравномерности: «нижний» индекс ($LI = МАЭД_{30} / МАЭД_{120}$) и «верхний» индекс ($HI = МАЭД_{160} / МАЭД_{120}$). Пороговое значение для диагностики дефекта установлено на уровне 1,5 для обоих индексов. Дополнительно введён критерий по абсолютному уровню МАЭД на груди (120 см) с порогом 100 мкЗв/ч.

Для каждого кабинета и каждой должности на основе пересечения доверительного интервала индекса с пороговым значением 1,5 определялся статус («красный» – требуется оптимизация, «жёлтый» – зона внимания или «зелёный» – безопасно). Итоговый статус кабинета для данной должности определялся как максимально строгий из трёх показателей.

Кластерный анализ выполнен методом межгрупповых связей. Проверка значимости связи между кластерами и статусами выполнена с помощью точного критерия Фишера-Фримана-Холтона.

Статистический анализ выполнен в пакете IBM SPSS Statistics 27.

Результаты. В 21% ($n=4$) кабинетов у врачей выявлен «красный» статус.

На основе дендрограмм и анализа коэффициентов агломерации для каждой должности определено оптимальное число кластеров - 3.

У врачей выделены три кластера: основной ($n=17$) с системным повышением «нижнего» индекса ($LI=1,89$) и два единичных кластера с экстремальными дефектами – в области головы ($HI=30,6$) и на уровне груди ($МАЭД_{норм120}=680$).

В первый кластер вошло абсолютное большинство врачей. Дозы умеренные на всех уровнях (от 16,92 до 38,65 мкЗв/ч). Наблюдается правильный гигиенический профиль: доза снижается кверху (на 160 см она минимальна – 16,92 мкЗв/ч). Средний «верхний» индекс НІМ=0,83 («зелёный» статус). Однако средний индекс ног LІМ=1,89, что превышает порог 1,5 и соответствует «красному» статусу. То есть у врачей из основной группы снижена защита нижних конечностей.

Во втором кластере МАЭД на уровне 160 см достигает 1040,00 мкЗв/ч. При этом на уровне 30 и 120 см дозы остаются относительно невысокими. «Верхний» индекс резко повышается до НІМ=30,6. Это пример игнорирования или отсутствия подвесной защитной ширмы при работе на очень «жёстких» режимах излучения (например, при косых или боковых проекциях дуги).

В третьем кластере установлена аномалия на уровне груди (120 см) доза составила 680,00 мкЗв/ч, а на уровне 160 см – 304,00 мкЗв/ч. При этом на уровне пола (30 см) доза минимальна – всего 12,80 мкЗв/ч. Такая картина характерна для работы без защитной ширмы. При этом нижняя часть ноги была идеально защищена нижним экраном стола (LІМ=0,019).

Выявлена статистически значимая связь между типом кластера и статусом радиационной безопасности: точный двусторонний критерий Фишера-Фримана-Холтона ($p=0,035$). Это подтверждает, что выделенные кластеры соответствуют реальным, клинически значимым группам кабинетов с различными типами дефектов защиты.

Выводы. Разработан и апробирован метод выявления рабочих мест с локальными дефектами стационарной радиационной защиты на основе метода кластеризации. В основной группе кабинетов выявлена системная проблема защиты ног (LІ=1,89).

В двух кабинетах выявлены критические аномалии: дефект защиты головы (НІ=30,6) и аномалия на уровне груди (МАЭД₁₂₀=680). Связь между кластерами и статусами статистически значима ($p=0,035$). Метод может быть рекомендован для практического применения как дополнение к стандартному дозиметрическому контролю.

Список литературы:

1. Bortoli, E. Dose estimation for interventional radiology staff: an update workload survey using a dose-tracking system / E. Bortoli, M. Biondi, R. Avitabile [et al.] // The European Physical Journal Plus. – 2025. – Vol. 140, Art. 587. – DOI 10.1140/epjp/s13360-025-06558-9.
2. Gasiea, R. Y. Radiation protection: safety measures and knowledge among interventional radiologists- a UK-based analysis of current practices and recommendations for improvement / R. Y. Gasiea, A. Rogers, R. Lakshminarayan [et al.] // CVIR Endovascular. – 2025. – Vol. 8, Art. 32. – DOI 10.1186/s42155-025-00540-3.
3. Kitamura, H. Survey on physicians' perceptions of occupational radiation exposure management: differences in perceptions by sex / H. Kitamura, T. Kuriyama, S. Matsuzaki, T. Moritake // The European Physical Journal Plus. – 2026. – Vol. 141, Art. 105. – DOI 10.1140/epjp/s13360-026-07327-y.
4. Neto, F. A. B. Dose Evaluation in Medical Staff during Interventional Radiology Procedures / F. A. B. Neto, C. A. C. Oliveira, S. R. B. Silva [et al.] // VI Latin American Congress on Biomedical Engineering CLAIB 2014, Paraná, Argentina 29, 30 & 31 October 2014 / ed. by A. Braidot, A. Hadad. – Cham : Springer, 2015. – P. 965–968. – (IFMBE Proceedings ; vol. 49). – DOI 10.1007/978-3-319-13117-7_235.
5. Rampado, O. Analysis of a CT patient dose database with an unsupervised clustering approach / O. Rampado, L. Gianusso, C. R. Nava, R. Ropolo // Physica Medica. – 2019. – Vol. 60. – P. 91–99. – DOI 10.1016/j.ejmp.2019.03.015.

ТЕХНОЛОГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ НОВЫХ ВИДОВ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

О.В. Паринов, Е.Г. Метляев, А.М. Лягинская, П.В. Максимова
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ ИМ. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва
metlyaev@mail.ru

Актуальность. Перспективным способом увеличения растущего энергопотребления является утилизация отработавшего ядерного топлива, содержащего уран и плутоний. В настоящее время ведется рециклинг - вторичное использование урана и плутония, извлеченных из отработавшего ядерного топлива, и их повторное включение в ядерный топливный цикл. Регенерированный уран и плутоний имеют сложный состав, обусловленный происхождением, степенью обогащения, выгоранием ядерных материалов, сроком хранения и токсичностью вновь создаваемого уран-плутониевого топлива, которая определяется физико-химическими свойствами используемых материалов [1].

Биологические эффекты воздействия смешанного уран-плутониевого комплекса на организм работающих будут определяться следующими свойствами изотопов плутония и урана:

- высокой радиотоксичностью изотопов плутония;
- альфа-активностью изотопов ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am ;
- бета-активностью изотопов ^{241}Pu , ^{242}Am ;
- низкоэнергетическим гамма-излучением ^{241}Am ;
- рентгеновским излучением плутония;
- нейтронной эмиссией изотопов ^{240}Pu ;
- ядерной опасностью изотопов ^{235}U , ^{239}U , ^{241}Pu [2].

Поведение в организме смешанного уран-плутониевого соединения подчиняется токсикологической характеристике поведения урана в организме – имеет полисистемный, полиорганный характер поведения, а радиационный эффект определяется плутонием, обладающим склерозогенным эффектом, приводящим к снижению функциональной способности органов и систем организма.

Предварительные оценки доз внешнего гамма-нейтронного ($2,5 \pm 0,5$ мЗв/год) и внутреннего облучения персонала (~ 1 мЗв/год) дают представление о текущих уровнях облучения работников экспериментальных установок. Внутреннее облучение персонала с предварительно оценёнными дозами порядка единиц мЗв в год, не может привести к превышению установленных ограничений радиационных рисков персонала [3].

Выявленные неопределенности в оценке радиационной обстановки на комплексных экспериментальных установках показали необходимость углубленной оценки состояния здоровья персонала, работающего на этих производственных участках.

В целях проведения оценки влияния на здоровье работников высокотехнологического ядерного производства, использован метод оценки общей заболеваемости, как ранний показатель эффекта облучения – снижение общей резистентности – физиологического состояния, а для количественной оценки заболеваемости – метод оценки относительного риска влияния негативных факторов производства на заболеваемость, где ведущим фактором вредности является радиационный.

Цель. Разработка технологии обеспечения медицинской безопасности персонала, участвующего в производстве новых видов ядерного топлива.

Материал и методы. Объектом исследования служили 50 работников экспериментального производства СНУП-топлива. Материалом исследования служили медицинские данные диспансеризации работников, представленные в виде индивидуальных диагнозов. Данные отражают не только заболеваемость в период работы в экспериментальном производстве, но и груз накопленных заболеваний, полученных в период занятости на предшествующей работе.

Оценивали: общую и первичную заболеваемость по результатам общей диспансеризации за весь период работы 2007-2018 гг.

В сравнительном анализе использованы данные о заболеваемости работников других производств ядерно-топливного цикла ХМЗ (химико-металлургического) и РХЗ (радиохимического).

В оценке риска влияния факторов производства на здоровье работающих суммарный риск факторов производства, принят за

единицу, которой соответствует определенный уровень здоровья, оцениваемый в показателях общей заболеваемости и заболеваемости отдельных органов и систем организма.

В качестве основной группы рассматривали заболеваемость работников производства СНУП-топлива, а в качестве группы сравнения – заболеваемость работников ХМЗ и РХЗ, работающих с плутонием в условиях соблюдения мер радиационной безопасности.

Абсолютный риск вычисляется по формуле:

$$AR_i = \frac{a_i}{\sum a_i} \quad (1)$$

где a_i – заболеваемость i -го класса по МКБ-10, $\sum a_i$ – всего заболеваний за период наблюдения.

Относительный риск рассчитываем по полученным значениям абсолютного риска для основной группы исследования ($AR_{\text{осн.}(i)}$) относительно значений абсолютного риска для группы сравнения ($AR_{\text{контр.гр.}(i)}$):

$$RR_{\text{осн.}(i)} = \frac{AR_{\text{осн.}(i)}}{AR_{\text{гр.сравн.}(i)}}; \quad (2)$$

$$RR_{\text{гр.сравн.}(i)} = \frac{AR_{\text{гр.сравн.}(i)}}{AR_{\text{осн.}(i)}}; \quad (3)$$

Суммарные относительные риски:

$$\Sigma RR_{\text{осн.}} = \sum_i RR_{\text{осн.}(i)}; \quad (4)$$

$$\Sigma RR_{\text{гр.сравн.}} = \sum_i RR_{\text{гр.сравн.}(i)}; \quad (5)$$

Обобщённый относительный риск:

$$RR = \frac{RR_{\text{осн.}}}{RR_{\text{гр.сравн.}}}; \quad (6)$$

95%-й доверительный интервал, для которого определяется по формуле:

$$ДИ = e^{\ln(RR) \pm 1,96 \sqrt{1/N_{\text{осн.}} + 1/N_{\text{гр.сравн.}}}} \quad (7)$$

где $N_{\text{осн.}}$ – число людей из основной группы персонала, $N_{\text{гр.сравн.}}$ – число людей из группы сравнения персонала.

Избыточный относительный риск имеет выражение:

$$ERR = RR - 1 \quad (8)$$

Чем ближе показатели относительного риска к 1, тем меньше различие в интенсивности воздействия условий производства на заболеваемость [4].

Результаты. В работу по оценке состояния здоровья персонала производства СНУП-топлива включен комплекс мероприятий по выявлению вредных и опасных факторов на рабочих местах или специальная оценка условий труда. К вредным факторам производства могут относиться высокий уровень шума, пыль, вибрация, излучение, плохое освещение, концентрация химических веществ, высокая или низкая температура воздуха, повышенная нагрузка на зрение. Специальная оценка условий труда работников производства СНУП-топлива показала присутствие вредных производственных факторов, после воздействия которых на восстановление функционального состояния организма работника требуется время более длительное, чем до начала следующей смены, риск повреждения здоровья увеличивается.

Общая заболеваемость работников экспериментального производства СНУП-топлива, проработавших на предприятии 10-12 лет и обследованных в 2014-2018 гг. составляла $1064,5 \pm 65,5$ на 1000 человек, и соответствовала уровню заболеваемости работников ХМЗ и РХЗ -- $1045,0 \pm 63,8$ и $1066,3 \pm 70,3$ соответственно.

В структуре общей заболеваемости работников экспериментального производства СНУП-топлива превышающие оценки заболеваемости, по сравнению с оценками на предприятиях ХМЗ и РХЗ, имеют 6 классов болезней: эндокринной системы – $56,5 \pm 14,7$, $28,2 \pm 4,0$ и $25,9 \pm 3,7$ на 1000 человек соответственно, глаза и его придаточного аппарата – $161,3 \pm 23,4$, $49,5 \pm 4,0$ и $54,5 \pm 4,2$ на 1000 человек, системы кровообращения – $96,8 \pm 18,8$, $29,4 \pm 6,8$ и $26,5 \pm 4,2$ на 1000 человек, органов пищеварения – $44,4 \pm 13,1$, $26,3 \pm 5,9$ и $34,2 \pm 4,8$ на 1000 человек, костно-мышечной системы – $129,0 \pm 21,3$, $112,1 \pm 13,6$ и

99,7±8,6 на 1000 человек и мочеполовой системы – 64,5±15,6, 45,7±7,4 и 40,7±3,8 на 1000 человек.

Широкий спектр классов болезней с превышающей частотой заболеваемости и наличие в моче работников плутония-239 и америция-241, фактические дозы внешнего γ -нейтронного облучения 2,5±0,4 мЗв/год, в том числе облучения хрусталика глаза – 2,3±0,5 мЗв/год, гонад – 3,4 мЗв/год, кожи лица – 2,7±0,6 мЗв/год и кожи запястий рук – 190,0±50,0 мЗв/год (при прогнозируемой эффективной дозе 4,5 мЗв/год), хотя и не превышающие допустимые пределы доз согласно НРБ-99/2009 [5], свидетельствуют о не вполне благополучной радиационно-гигиенической ситуации.

Оценка относительного риска заболеваемости работников экспериментального производства СНУП топлива в сравнительном аспекте с риском заболеваемости работников ХМЗ и РХЗ, работающих в контакте с плутонием в условиях соблюдения мер радиационной безопасности в плане контроля индивидуальных доз облучения и соблюдения нормативных гигиенических параметров в производственных помещениях, выявила более высокий относительный риск влияния факторов производства на общую заболеваемость работников СНУП-топлива, чем производства ХМЗ – $RR_{\text{снуп/хмз}}=1,28$ и более низкий риск влияния на производстве РХЗ – $RR_{\text{снуп/рхз}}=0,84$. Вместе с тем показано, что относительный риск влияния радиационного фактора на заболеваемость работников на производстве СНУП-топлива выше, чем на ХМЗ – $RR_{\text{снуп/хмз}}=1,62$ и на РХЗ – $RR_{\text{снуп/рхз}}=1,50$. В общей оценке относительного риска заболеваемости радиационно обусловленный риск на производстве СНУП топлива составляет 59,3%, на ХМЗ СХК – 46,8% и на РХЗ СХК – 39,3%.

В структуре общей заболеваемости работников производства СНУП-топлива высокий относительный риск, по сравнению с риском заболеваемости работников производств ХМЗ и РХЗ имеют пять классов болезней: системы кровообращения – $RR_{\text{снуп/хмз}}=3,23$ и $RR_{\text{снуп/рхз}}=3,66$, глаза – $RR_{\text{снуп/хмз}}=3,20$ и $RR_{\text{снуп/рхз}}=2,97$, системы пищеварения – $RR_{\text{снуп/хмз}}=1,65$ и $RR_{\text{снуп/рхз}}=1,30$, мочеполовой системы – $RR_{\text{снуп/хмз}}=1,39$ и $RR_{\text{снуп/рхз}}=1,59$, костно-мышечной системы – $RR_{\text{снуп/хмз}}=1,13$ и $RR_{\text{снуп/рхз}}=1,30$ с суммарным коэффициентом относительного риска – $RR_{\text{снуп/хмз}}=10,6$ и $RR_{\text{снуп/рхз}}=10,82$, составляя 58,3% и 60,6% общего риска.

Выполненный анализ относительного риска заболеваемости работников производства СНУП-топлива и работников производств ХМЗ и РХЗ выявил следующие основные факты. Относительный риск общей заболеваемости работников производства СНУП-топлива выше, чем на производстве ХМЗ $RR_{\text{СНУП/ХМЗ}} = 1,28$ и ниже, чем на РХЗ – $RR_{\text{СНУП/РХЗ}} = 0,84$. Относительный риск заболеваемости шести ведущих классов болезней (дыхания, глаза и его придаточного аппарата, кровообращения, костно-мышечной, мочеполовой, кожи, травм и отравлений) у работников СНУП-топлива выше чем у работников ХМЗ и РХЗ и составляли – $RR_{\text{СНУП/ХМЗ}} = 1,57$ и $RR_{\text{СНУП/РХЗ}} = 1,82$.

Высокая частота общей заболеваемости, широкий спектр классов болезней с повышенной заболеваемостью у работников производства СНУП-топлива, свидетельствующая о снижении общей резистентности организма, и более высокий радиационный риск влияния на заболеваемость в общей оценке риска негативных факторов производства, может расцениваться как формирование ранней профессионально обусловленной патологии (заболеваемости) у работников производства СНУП-топлива.

Выводы. Применение новой медицинской технологии обеспечения безопасности персонала производства новых видов ядерного топлива позволило выявить относительный риск влияния производства СНУП-топлива на заболеваемость работников, а также объяснить рост профессионально обусловленной заболеваемости разной этиологии. Это повышает роль и значение проводимых предварительных и периодических осмотров и требует более строгого контроля за принятием решения о допуске работника к работе с имеющимися противопоказаниями.

Список литературы:

1. Адамов Е.О., Власкин Г.Н., Лопаткин А.В. [и др.]. Радиационно-эквивалентное обращение радиоактивных нуклидов в ЯТЦ - эффективная альтернатива отложенному решению проблемы накопления ОЯТ // Известия Российской академии наук. Энергетика (2015) № 6. – С. 15-25.
2. Ильин Л.А., Самойлов А.С., Цовьянов А.Г., Шинкарев С.М., Шандала Н.К., Ганцовский П.П., Карев А.Е., Кухта Б.А., Симаков А.В., Ключков В.Н., Коренков И.П., Лягинская А.М., Паринов О.В., Соломатин В.М., Измestьев К.М. Радиационно-гигиенические исследования

экспериментального производства смешанного нитридного уран-плутониевого топлива на АО «СХК». Часть 1: Методы и результаты // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 5. С.23–32.

3. Проблемы оценки состояния здоровья персонала, работающего в условиях новых технологий производства ядерного топлива / О.В. Паринов, А.М. Лягинская, Н. К. Шандала [и др.] // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2021. – Т. 66, № 3. – С. 9-12. – DOI 10.12737/1024-6177-2021-66-3-9-12. – EDN NQEITT.

4. Ильин Л.А., Самойлов А.С., Цовьянов А.Г., Шинкарев С.М., Шандала Н.К., Ганцовский П.П., Карев А.Е., Кухта Б.А., Симаков А.В., Клочков В.Н., Коренков И.П., Лягинская А.М., Паринов О.В., Иванов В.К., Чекин С.Ю., Меняйло А.Н., Туманов К.А., Соломатин В.М., Измestьев К.М. Радиационно-гигиенические исследования экспериментального производства смешанного нитридного уран-плутониевого топлива на АО «СХК». Часть 2: Дозы и риски // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022. Т. 67. № 1. С. 39–45.

5. Сравнительный анализ относительного риска заболеваемости населения территории «уранового наследия» и территорий влияния АЭС / Метляев Е.Г., Купцов В.В., Шандала Н.К., Лягинская А.М., Паринов О.В. // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). – 2025. – Т. 34, № 2. – С. 109-121.

6. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарные правила и нормативы СанПин 2.6.1.2523-09. Доступно по: <https://files.stroyinf.ru/Data1/56/56325/>. Дата обращения: 09.12. 2025.

РАДИАЦИОННАЯ КОММУНАЛЬНАЯ ГИГИЕНА – НАУКА О РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ

Н.К. Шандала, Ю.Е. Квачева, В.А. Серегин, А.А. Филонова
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, г. Москва
[*shandala-fmbc@bk.ru*](mailto:shandala-fmbc@bk.ru)

Актуальность. Наука о радиационной безопасности населения, называемая также радиационной коммунальной гигиеной, родилась вслед за созданием атомной промышленности в конце сороковых годов прошлого столетия. Институт биофизики послужил колыбелью, в которой была возвращена эта новая наука – радиационная коммунальная гигиена, призванная обеспечить радиационную безопасность в мире, насыщенном ядерным оружием, атомной энергетикой, радиоактивными отходами, техногенными источниками излучений в медицине, промышленности и других сферах деятельности [1].

Цель: показать роль радиационной коммунальной гигиены в обеспечении безопасности населения, подвергающегося техногенному облучению и проживающему вблизи действующих, выводимых из эксплуатации и реабилитируемых радиационно опасных объектов.

Материал и методы. Современная методология радиационно-гигиенических исследований, используемая в работах по обеспечению радиационной безопасности населения, охватывает объекты и территории всех звеньев ядерного топливного цикла России. Для оценки радиоактивности окружающей среды решаются задачи получения в динамике достаточной и достоверной информации об интенсивности ионизирующего излучения на территориях и о содержании радионуклидов в различных объектах окружающей среды, а также в местных пищевых продуктах и питьевой воде. Используемые методы: радиационно-гигиенический в натурных исследованиях, радиометрический, спектрометрический, радиохимический, санитарно-эпидемиологический надзор, включая разработку регулирующих документов [2]. География исследовательских работ по радиационной безопасности населения –

объекты и территории, обслуживаемые ФМБА России, - охватывает регионы Дальнего Востока, Камчатки, Забайкалья, Ставропольского края, Северо-Запада России и Заполярья.

Результаты. Начиная с 2003 г. и по настоящее время нами выполняются исследования на одном из крупнейших объектов ядерного наследия – пункте временного хранения (ПВХ) ОЯТ и РАО в губе Андреева и поселке Гремиха на побережье Баренцева моря. Кроме того, проведен комплекс работ в регионах размещения судоремонтных заводов и предприятий, осуществляющих утилизацию атомных подводных лодок, судов атомного технологического обслуживания и кораблей с ядерно-энергетическими установками. С 2009 г. нами проводились работы на дальневосточном ПВХ ОЯТ и РАО в бухте Сысоева и на ПВХ в бухте Разбойник на Камчатке. Подобные многолетние исследования позволяют не только охарактеризовать объекты и территории ядерного наследия, но и выявить особенности пространственно-временного распределения радионуклидов. Согласно результатам выявлено [3]:

- наличие больших объемов техногенно загрязненных почв, которые по уровню активности в ряде случаев относятся к категории РАО;

- основные радионуклиды – ^{90}Sr и ^{137}Cs – распределены в окружающей среде (включая морскую акваторию) локально в результате миграции из хранилищ ОЯТ и РАО. При этом техногенное загрязнение распространяется в грунтовые и подземные воды, а также на локальные участки прибрежной морской акватории;

- удельная активность ^{137}Cs и ^{90}Sr в подземной воде из скважин значительно превышает установленные нормативы для питьевой воды – уровни вмешательства. В воде из подземных скважин зафиксировано превышение ПДК ряда тяжелых металлов 1 и 2 класса опасности.

Исследования на территориях и объектах уранового наследия в России и государствах Центральной Азии ведутся с 2000-х годов до настоящего времени. В ходе исследований на территориях Приаргунского производственного горно-химического объединения им. Е.П. Славского в Забайкалье, выведенного из эксплуатации ЛПО «Алмаз» в г. Лермонтове Ставропольского края и в районе бывших

урановых рудников в Калмыкии получена информация о загрязнении всех объектов окружающей среды, источников водоснабжения, местных пищевых продуктов; изучена эквивалентная равновесная объемная активность радона и оценены дозы облучения населения. Полученные результаты явились основанием для переселения людей из п. Октябрьский в г. Краснокаменск и проведения реабилитационных работ в районах штолен на горах Кавказского хребта – Бештау и Бык. Исследования на территориях уранового наследия проводились также в странах Центральной Азии (Кыргызская Республика и Республика Таджикистан). В результате предложены рекомендации по совершенствованию социально-гигиенического мониторинга и разработаны критерии реабилитации территорий при добыче урановых руд [4].

Учитывая активное присутствие человека в Арктической зоне, увеличение грузооборота по Северному морскому пути, возрастает внимание к радиационной обстановке в местах затопления ядерно- и радиационно опасных объектов в Карском и Баренцевом морях. Нами проведены работы по радиационно-гигиеническому мониторингу на территориях проживания населения – село Териберка, остров Кильдин и поселок Амдерма.

Мощным толчком совершенствования радиационной коммунальной гигиены стала авария на Чернобыльской АЭС, масштабы и сложность радиационной обстановки которой потребовали разработки новых, дополнительных гигиенических нормативов и правил для обеспечения радиационной безопасности населения, проживавшего в зонах радиоактивного загрязнения [5]. В целом, наследие Чернобыля породило три главнейших для радиационной коммунальной гигиены выводы, позволившие совершенствовать эту науку.

Во-первых, это формирование новой системы радиационной защиты. Во многом под влиянием чернобыльского опыта МКРЗ и МАГАТЭ существенно развили международную систему радиационной защиты, отказавшись от концепции «практики и вмешательства» и заменив её на три вида ситуаций облучения: планируемое, существующее и аварийное; введя новые значения граничных доз и референтных уровней в зависимости от категории облучаемых лиц.

Во-вторых, это новая методология изучения биологических

материалов, когда нашими учеными, одними из первых в мире была предложена методология биобанкинга случаев радиационных поражений человека. Большую часть созданного биобанка занимают материалы секционных исследований погибших в результате аварии на Чернобыльской АЭС.

В третьих, это пересмотр организационных принципов проведения йодной профилактики в случае радиационной аварии и величин ожидаемых доз облучения при которых йодная профилактика необходима. В результате было разработано новое, действующее в настоящее время «Руководство по йодной профилактике в случае возникновения радиационной аварии», доработанное в настоящее время в связи с участвовавшими атаками ВСУ на Запорожскую АЭС в ходе специальной военной операции.

Выполняя функции регулирования радиационной безопасности населения, за последние десятилетия вышли в свет более 30 новых нормативно-методических документов, разработаны методические указания по контролю практически всей линейки природных и техногенных радионуклидов в объектах окружающей среды и пищевых продуктах.

Вместе с тем, имеются достаточно веские основания для совершенствования системы обеспечения и регулирования радиационной безопасности населения, в частности необходима гармонизация российской нормативно-методической базы по радиационной безопасности с современными международными документами.

Перспективные проблемы в сфере обеспечения радиационной безопасности населения формируют новые виды ядерного топлива, разрабатываемые атомной отраслью России с целью замыкания ядерного топливного цикла. Наряду с изучением воздействия факторов производственной среды на персонал, требуется реализация исследований, направленных на изучение состояния окружающей среды и радиационной безопасности населения, проживающего в районах расположения предприятий, производящих новые виды топлива.

Выводы. Радиационно-гигиенический мониторинг как основа методологии науки радиационной коммунальной гигиены, позволяет комплексно решать сложные проблемы радиационной безопасности населения:

- обеспечение безопасного обращения с ОЯТ и РАО;
- обеспечение приемлемого уровня риска влияния на человека и окружающую среду радиационно опасных объектов;
- повышение доверия общества к дальнейшему развитию атомной энергетики и промышленности.

Список литературы:

1. Радиационная гигиена и безопасность населения. Отделу радиационной безопасности населения 70 лет / Н.К. Шандала [и др.]. - Москва: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2024. - 122 с.
2. Ильин Л.А., Шандала Н.К., Савкин М.Н. и др. Место и роль радиационно-гигиенического мониторинга в системе социально-гигиенического мониторинга // Гигиена и санитария, 2004. № 5. С. 9-15.
3. Shandala N., Sneve M., Seregin V. and Filonova A. Radiation Survey and Environmental Impact Assessment at the Site of Temporary Storage at Andreeva Bay (16 years of studies) // J. Radiol. Prot. 41 (2021). P. 406 – 426.
4. Бельских Ю.С., Шандала Н.К., Титов А.В. и др. Исследование радиационной обстановки на отвалах рудника № 1 ЛПО «Алмаз» через 5 лет после проведения рекультивации // Гигиена и санитария. 2022, Т. 101(7). С. 736-740.
5. Шандала Н.К., Квачева Ю.Е., Серегин В.А., Филонова А.А., Удалов Ю.Д., Паринов О.В., Сухов В.А., Теплинская Т.А., Теплинская Т.А., Семенова М.П. Десять вопросов по радиационной гигиене. Тема: ядерный терроризм. – Москва: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2026 – 32 с.
6. Квачева Ю.Е., Шандала Н.К., Паринов О.В. и др. Вопросы научного обеспечения радиационной безопасности на основе опыта преодоления последствий Чернобыльской аварии // Медицина катастроф. 2021. № 3. С. 10-19.

PERSONS IN UTERO EXPOSED BY THE CHERNOBYL ACCIDENT: DIFFERENCES AND ASSOCIATIONS BETWEEN IQ LEVELS, RADIATION DOSE, AND THYROID HORMONE

Sergey Igumnov

Institute of Psychology, Belarusian State Pedagogical University, Minsk,

Belarus

sa.igumnov@gmail.com

Abstract

Introduction

There is a scarcity of studies that explore effects of prenatal (in utero) radiation exposure on human health and well-being. To understand mechanisms of possible negative effects, we followed a Belarussian cohort including 250 persons exposed in utero to radiation from the Chernobyl accident in 1986 (a group with higher exposure) and of a control group of 250 persons matched on age and sex born in areas with little or no contamination (a group with less exposure). Previous analyses showed a significant difference in IQ (Intelligence quotient) between the two groups at age 7 years, but not later. We used the data from this cohort to further explore the possible relationship between dose, thyroid hormones levels and IQ.

Methods

The dataset included information on estimated in utero radiation dose, gestation week at the time of the accident; thyroid hormones T3 (triiodothyronine) and T4 (thyroxine) levels and general IQ at three points of time (longitudinal): t1: 6-7 years old; t2: 11-12 years old and t3: 15-16 years old. Descriptive and inference (regression) analyses were used to explore the dynamic of changes through time and associations between main variables adjusted by sex at the three time points.

Results

Significant differences in levels of T3 (not of T4) and thyroid dose were observed between the in utero exposed and control groups in general with lower values in the latter; and in IQ at t1 (6-7 years old) with higher values in the control group, as per bivariate chi-square tests performed. Both verbal and non-verbal IQ were significantly higher in the

control group at t1. Results of regression models performed in both groups separately showed that T4 was not significantly associated with IQ in both groups. In the exposed in utero group, thyroid dose T3 showed statistically significant inverse relationships with IQ at t3 (15-16 years old) which was more pronounced in the non-verbal parts of it.

Conclusions

Our analysis suggests a reverse association between IQ and dose in the in utero exposed group. Further in-depth analyses are underway to better characterize these associations, considering possible confounding factors.

Key words: in utero exposure, Chernobyl accident; thyroid hormones, IQ

Information about the authors:

Igumnov Sergey A. – MD, PhD, Professor (SPIN-code: 1607-8697; Researcher ID: E-7975-2018; ORCID ID: 0000-0003-3582-9751; Scopus Author ID: 6602771038).

Place of work and position: Professor, Institute of Psychology, Belarusian State Pedagogical University named after M.Tank, Minsk, Belarus

Address: 18, Sovetskaya str., Minsk 220030, Belarus, e-mail: sa.igumnov@gmail.com

Financing: The study was performed without external funding.

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

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИАЦИОННОЙ БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЫ

И.Б. Ушаков

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

iushakov@fmbcfmba.ru

Актуальность. Полет Ю.А. Гагарина укрепил вековые мечты человека о полетах на другие планеты. Человечество все ближе к межпланетной пилотируемой космонавтике. Совсем не зря 6 февраля 2025 года в Кремле прозвучал только на первый взгляд необычный вопрос Президента страны, обращенный к молодым ученым: «Скажите, сегодняшние современные радиационно-защитные композиты – они позволят, скажем, коровам долететь до Марса и вернуться? Или зайчикам, или кошкам, или собакам?» Это был важный сигнал современной космической науке! При разработке планов создания базы на Луне, окололунных станций и осуществления планетных экспедиций необходимо учитывать, что во многом подходы к организации жизни и деятельности их экипажей будут иными, отличными от орбитальных полетов. В этой связи решение проблемы радиационной безопасности таких экспедиций является новой приоритетной задачей.

Цель работы – проанализировать возможные радиобиологические последствия орбитальных и будущих межпланетных полетов.

Результаты. В будущих межпланетных полетах экипаж будет подвергаться комбинированному с радиацией воздействию одновременно или последовательно действующих многочисленных факторов: общие условия экспедиции; психофизиологические факторы; иные физические факторы межпланетного пространства (гипомагнитная среда, метеоритная опасность); динамические факторы межпланетного полета; условия пребывания на Луне и Марсе – гипогравитация 0,16 и 0,38 g, гипомагнитная среда, низкие температуры со значительными суточными и сезонными колебаниями, низкое атмосферное давление, высокое содержание в атмосфере CO₂, низкое содержание O₂, пылевые бури и их

токсикологические и другие аспекты, сильные ветры, возможные экзобиологические факторы. В такой гуще сильных факторов следует выделить 5 основных воздействий или их комбинаций, которые могут обладать силой непреодолимого барьера из-за выраженного влияния на человека: радиационный, токсико-пылевой, гипوماгнитный, гипогравитационный, и психофизиологический. Рассмотрим барьеры, непосредственно связанные с эффектами космической радиации.

Первый опасный барьер – радиационный. Источники космической радиации (КР) многообразны. Они включают радиационные пояса Земли, это в основном протоны и электроны с коэффициентом качества (КК) от 1.5 до 2.5. Далее – солнечные космические лучи, также в основном протоны до 1000 МэВ с КК до 2.0. И третья важнейшая компонента – галактические космические лучи, в состав которых входят ускоренные ионы от водорода и гелия и далее практически всей периодической таблицы химических элементов с высокими величинами КК до 5 и выше. Здесь очень много зависит от локализации в космическом пространстве и периоде солнечной активности. Есть и четвертая компонента КР – нейтронное и гамма-излучение – вторичное, возникающее в ядерных взаимодействиях первичного космического излучения с веществом космического аппарата и биологической тканью, или в случае наличия на борту ядерно-энергетических и каких-либо других радиоизотопных установок (до 30 % общей дозы) [1].

Адекватно смоделировать такой непростой космический «радиационный коктейль» в наземном эксперименте невозможно. Изучать биологическое действие КР исследователям приходится «по частям», составляя потом из них общую картину радиационного поражения в космосе. Таким образом, работает сложный радиобиологический принцип – «изучать отдельно, оценивать в комплексе». Суточная доза на борту МКС в 200 раз превышает таковую на Земле. За годовой полет это уже до 300 мЗв, а профессиональный предел космонавта, как и персонала группы А – 1000 мЗв. Для межпланетных условий важна величина 1,4 мЗв на Луне (примерно в 600 раз выше, чем на Земле) и чуть больше в полете к Марсу – 1,8 мЗв.

Перейдем к оценке возможных медико-биологических эффектов облучения у человека. Вклад одного радиационного

фактора, конечно, выделить очень сложно. Глобальный и самый главный показатель – смертность – пока не выявил достоверного влияния космических полетов на здоровье, в том числе и по онкологическим заболеваниям. Результат получен независимо в российских и американских эпидемиологических исследованиях. Риск смерти в когорте космонавтов оказался достоверно ниже по сравнению с референтной группой. Космонавт Олег Кононенко, находясь в космосе уже 3 года, установил абсолютный мировой рекорд: в пересчете на КР он «прожил в космосе 600 лет»! [1].

Возможные радиационные эффекты в дальнем космосе включают: ближайшие – острая лучевая болезнь (при выраженных солнечных протонных событиях), нарушения в центральной нервной системе (ЦНС), повреждение органа зрения (сетчатка); отдаленные – радиационный канцерогенез, поражение ЦНС, катарактогенез, нарушение репродуктивной функции, а также ускоренное биологическое старение органов и систем. Они изучаются в наземных радиобиологических экспериментах на грызунах и приматах. Приматы – наиболее адекватный объект для исследования ЦНС в лабораторных условиях, что обусловлено наибольшей близостью их к человеку по основным нейрофизиологическим параметрам. Чаще в качестве объекта для моделирования элементов операторской деятельности выбираются макаки-резусы (*Macaca mulatta*).

Особенности будущих дальних длительных космических полетов включают: риск радиационного поражения мозга за счет воздействия КР, комбинированное влияние радиации и других факторов полета – невесомость, космическая пыль, гипомагнитная и измененная газовая среда, вибрация, шум, ЭМИ, гипертермия и комплекс психофизиологических факторов, связанных с длительностью и автономностью полета.

Проблематика современных косморadiобиологических исследований включает: эффекты хронических, квазихронических и фракционированных длительных облучений. Во-вторых, продолжает исследоваться специфика нарушений от тяжелых заряженных частиц (ТЗЧ). Третье – комбинированные модифицирующие эффекты других факторов космоса – лунной пыли (ЛП), невесомости, стресса и т. д. Далее – разработка новых поведенческих методик, примитивных аналогов операторской деятельности космонавта. И, наконец,

экстраполяции экспериментальных данных на человека. Здесь заложены и самые большие количественные ошибки в оценке общего радиационного эффекта. Человек в космосе должен сохранять работоспособность до окончания полета [1]. Неплохим примером является проект «Гамма-бриз», выполненный в ИМБП РАН (2008-2010), в котором моделировалось на приматах облучение экипажа во время марсианской экспедиции. Эксперимент проводился параллельно с Международным научным экспериментом – проект «Марс-500» (2009-2011 гг.). В этих экспериментах при невысоких дозах протяженного облучения (130-250 сГр) существенно снижалась поведенческая операторская активность обезьян.

ЦНС обладает безусловной чувствительностью к радиационному фактору в малых дозах. Изменения неспецифичны, протекают волнообразно и не имеют линейной дозовой или временной зависимости, что вероятно свидетельствует о «раздражающем» эффекте малых доз ионизирующего излучения применительно к мозгу. Нарушения от тяжелых ионов даже в малых дозах развиваются и усиливаются во времени. При облучении ионами ^{12}C (1 Гр, 160 МэВ), обладающими меньшей относительной биологической эффективностью по сравнению с ^{56}Fe , в более ранние сроки, чем при гамма-облучении, происходят существенные изменения в обмене моноаминов в мозге, причем наиболее чувствительными структурами являются префронтальная кора, nucleus accumbens (прилежащее ядро) и гиппокамп. Эти структуры ЦНС отвечают за когнитивную деятельность организма. Эффекты воздействия высокоэнергетических протонов (165 МэВ) в аналогичных дозах (1.5–3 Гр) практически аналогичны эффектам гамма-излучений и могут быть оценены как незначительные. Это направление является также приоритетным в мировой косморadiобиологической литературе [2]. Результаты исследований биологического действия тяжелых ядер на генетический аппарат клеток свидетельствуют о высокой опасности тяжелых ядер галактических космических лучей для экипажей кораблей при осуществлении межпланетного полета.

Важнейшим для дальнейшего проникновения человека в космос является обоснование разумных пределов облучения космонавтов. Трудности этого направления заключаются, как и в дозиметрии, в упоминавшемся триедином характере состава КР. Нормирование

излучений с высокими значениями ОБЭ, широкий диапазон мощностей доз протонов и перепады дозы по телу космонавта от 2 до 20 раз, представляет значительную проблему. Благодаря этим и последующим работам были определены зависимости радиационного риска от величины обобщенной дозы в течение всей жизни для космонавтов России, астронавтов США, Японии. Они независимо оказались очень близкими. В России появился, наконец, новый нормативный документ, утвержденный Роскосмосом и ФМБА [9]. В этом документе предел дозы за год снижен с 500 до 300 мЗв. Это самый малый годовой предел в мире. Примечательно, что в настоящее время на МКС на высотах среднетканевая доза на костный мозг может достигать 230 мЗв. Пределы КР на хрусталик и кожу в новом документе также снижены и приведены в соответствие с НРБ-2009 [3].

Понятие радиорезистентности – ключевое в разработке средств профилактики и защиты от КР [4]. В общей структуре направлений повышения радиорезистентности космонавтов в дальнем космосе учтено многое, но в будущем предстоит приложить немало усилий для доработки большинства элементов. К сожалению, противорадиационный модуль бортовой аптечки пока не разработан. Отсутствуют радиопротекторы для ТЗЧ и для хронических облучений, не предусмотрены средства ранней терапии на случай переоблучения. Пока не созданы и эффективные средства профилактики и лечения возможных радиационных нарушений ЦНС, профилактики актуальных для космоса опухолей.

Существенно, что противолучевые средства в космосе ни при каких условиях не должны вызывать побочных реакций, снижать работоспособность человека, не должны влиять на координацию движений и остроту зрения, нарушать иммунитет и снижать устойчивость организма к экстремальным факторам. В будущую бортовую аптечку необходимо ввести отечественный радиопротектор экстренного действия препарат Б-190 (индралин), эффективный при гамма-, гамма-нейтронном и протонном облучениях. Его противолучевой эффект подтвержден на 6 видах животных, включая крупных (собаки, обезьяны). Благодаря многолетним работам академика Л.А. Ильина и профессора М.В. Васина эффективность протектора проверена в Чернобыле у лётчиков-ликвидаторов последствий аварии [5]. Препарат Б-190 не снижает способность человека к динамической работе, статическую

выносливость, сенсомоторные реакции, не провоцирует тремор покоя и движения, не оказывает влияния на качество пилотирования.

В дальнейшем длительном космическом полете возможно развитие постлучевых вторичных иммунодефицитов с нарушением иммуно- и гемопоез-регуляторных функций. Вероятно, потребуются антибактериальные и противовирусные препараты, а также иммуноглобулины, лактоферрин и пробиотики. Важными элементами профилактики и раннего лечения лучевой болезни могут стать адаптогены, вакцины и цитокины (беталейкин и т. п.). Необходимы будут банки клеток и тканей на случай аварийного переоблучения (кровь, костный мозг, клетки кожи, половых желез, слизистой десны).

Гораздо менее изученными на сегодня являются токсикопылевой и гипомагнитный барьеры [1, 6]. На Луне, на Марсе, в окололунном и межпланетном пространстве напряженность магнитного поля на 3-5 порядков ниже напряженности привычного геомагнитного поля. Выявлено, что систематическое пребывание в таких гипомагнитных условиях (ГМУ) по 6–8 часов в сутки, как правило, отрицательно влияет на здоровье. Поэтому в России впервые в мире законодательно приняты ограничения на предельные величины ГМУ (СанПин 2.1.8/2.2.4.2489-09). Одно из возможных решений проблемы ГМУ в космосе заключается в создании в обитаемых объемах искусственных аналогов геомагнитного поля.

Перспективным, но пока мало разработанным способом преодоления радиационного и других космических барьеров является искусственная гибернация (гипобиоз, криобиоз, торпор и т. п.), обоснованная в работах выдающегося отечественного ученого Н.Н. Тимофеева [1]. Необходима многофакторная наземная отработка ее различных режимов, применяемая на Земле во многих критических для жизни человека ситуациях.

Выводы. Вариантов облучения в космосе (особенно дальнем) столь много, что единственного эффективного радиозащитного средства просто не существует в принципе. Акцент в поиске новых средств следует сделать на радиомодуляторы и радиомитигаторы, усиливающие репаративные постлучевые процессы. Необходимы и новые молекулярно-генетические идеи повышения радиорезистентности человека. В экипаже длительного

межпланетного полёта обязательно должен быть врач-радиобиолог или радиолог, а в бортовой аптечке необходимы средства всей «суммы радиобиологии» на момент старта. Вероятным следует рассматривать синергизм в действии лунной пыли и КР в отношении возрастания риска развития отдаленных стохастических эффектов после возвращения космонавтов на Землю из долгосрочных лунных экспедиций, либо при последующем за лунным этапом межпланетном пилотируемом полете на Марс тех же космонавтов.

Список литературы:

1. Ушаков И.Б. Космос. Радиация. Человек (Радиационный барьер в межпланетных полетах). – М.: Научная книга, 2021. 352 с.
2. Bulanova T.S., Boreyko A.V., Zadneprianetc M.G., Krasavin E.A., Kulikova E.A., Smirnova E.V., Severiukhin Y.S., Timoshenko G.N. Formation of DNA Double-Strand Breaks in Rat Brain Neurons after Irradiation with Krypton Ions (78Kr) // Physics of Particles and Nuclei Letters. 2019. V. 16. № 4. P. 402–408.
3. Ограничение облучения космонавтов при околоземных космических полетах (ОКОКП-2021). Методические рекомендации МР ФМБА 17.01-2021. М.: ГК «Роскосмос», ФМБА. 44 с.
4. Cortese F., Klovov D., Osipov A., Stefaniak J., Moskalev A., Schastnaya J., Cantor Ch., Aliper A., Mamoshina P., Ushakov I. Vive la radioresistance!: converging research in radiobiology and biogerontology to enhance human radioresistance for deep space exploration and colonization // Oncotarget. 2018. V. 9, № 18. P. 14692–14722.
5. Васин М.В., Ильин Л.А., Ушаков И.Б. Феномен противолучевой защиты индрилином крупных животных (собак) и его экстраполяция на человека // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022. Т. 67. № 3. С. 5–12.
6. Баринов В.А., Ушаков И.Б. Токсикология лунной пыли в аспекте возможной профессиональной патологии космонавтов-участников экспедиции на Луну // Медицина труда и промышленная экология. 2022. Т. 62. № 2. С. 72–90.

РАЗДЕЛ № 2. «ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЗДРАВООХРАНЕНИИ»

ОЦЕНКА РАННИХ ЛУЧЕВЫХ РЕАКЦИЙ ПРИ АДЪЮВАНТНОЙ БРАХИТЕРАПИИ РАКА МАТКИ

А.А. Завьялов, Ю.Д. Удалов, Л.Р. Хайретдинова, Н.Ф. Артикбаева

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

azav06@mail.ru

Актуальность. Рак матки (РМ), включая рак шейки матки (РШМ) и рак тела матки (РТМ) представляет собой серьезную проблему для здравоохранения во всем мире. В Российской Федерации ЗНО тела матки стабильно занимает третье место (8,0%), а ЗНО шейки матки находится на шестой позиции (4,5%) в структуре онкологической заболеваемости у женщин. В структуре причин онкологической смертности РТМ занимает девятое ранговое место (5,5%), а РШМ находится на десятом месте (4,9%) [1]. В настоящее время большое внимание уделяется развитию эффективных методик лечения ЗНО, которые включают в себя лучевую терапию. Ключевыми методами лучевой терапии при РШМ являются дистанционная лучевая терапия (ДЛТ) и контактная лучевая терапия (брахитерапия). При проведении брахитерапии (БТ) радиоактивные источники с помощью аппликаторов имплантируются непосредственно в очаг новообразования. Такой подход обеспечивает прецизионную доставку высокой дозы облучения к опухоли, эффективно воздействуя на нее и щадя при этом окружающие здоровые структуры [2].

Преимущество БТ над ДЛТ состоит в эффективном локальном контроле опухоли, что связано с максимальной концентрацией терапевтической дозы непосредственно в зоне новообразования. В исследовании Karlsson J. и соавт. показано, что БТ значительно улучшает результаты лечения РШМ. У пациентов, получавших БТ, по сравнению с теми, кто получал курс ДЛТ, наблюдались гораздо

более высокие показатели полной ремиссии (92,5 % против 73,3 %) и пятилетней выживаемости (68,5 % против 35,4 %) [3].

Несмотря на позиционирование БТ как малоинвазивного метода лечения, ей присущ ряд потенциальных осложнений. У пациенток могут развиваться осложнения, возникающие как в процессе, так и после проведения лучевой терапии. Степень выраженности и частота манифестации лучевых повреждений обусловлены комплексом взаимосвязанных факторов. Приоритетное значение отводится дозиметрическим характеристикам лечебного плана: величина разовой очаговой дозы (РОД), суммарной очаговой дозы (СОД), режим фракционирования, применение радиомодификаторов. А также наличие сопутствующих воспалительных процессов в органах малого таза (ОМТ), общесоматическому статусу пациенток. Лучевые реакции могут быть вызваны как индивидуальной чувствительностью к лучевой терапии, так и необходимостью использовать высокие дозы, направленные на уничтожение опухоли, которые порой превосходят пределы переносимости для окружающих здоровых тканей [4, 5].

Лучевые повреждения классифицируются исходя из сроков их клинической реализации на две категории: ранние последствия и поздние. К первой группе относят патологические изменения, регистрируемые непосредственно в ходе реализации курса облучения либо в пределах трехмесячного интервала после его завершения. Такой временной интервал обусловлен тем, что в большинстве случаев именно в этот период завершается регенерация поврежденных клеток. Вторая группа включает лучевые повреждения выявляющиеся спустя три месяца и более, после завершения курса лучевой терапии.

Разграничение лучевых реакций обусловлено различным патогенезом их развития. Понимание особенностей этих процессов имеет важное клиническое значение.

Непосредственное повреждение ДНК нормальных клеток ионизирующим излучением вызывает ранние лучевые реакции. Это приводит к снижению эффективности восстановления клеток и нарушению их микроциркуляции. Как правило, такие явления обычно носят временный характер. Лучевой нагрузке наиболее подвержены активно пролиферирующие клетки. Величина дозы за

фракцию оказывает минимальное влияние на развитие ранних повреждений, тогда как укорочение общего времени лучевой терапии приводит к увеличению их частоты встречаемости и тяжести проявлений. Наличие ранних лучевых повреждений не является абсолютным предиктором развития поздних осложнений. Прямая клиническая корреляция отмечена не более чем в половине случаев. В тоже время наличие определенной патогенетической связи между ними доказано.

Поздние лучевые повреждения возникают в результате патологических изменений в кровеносных и лимфатических сосудах на клеточном уровне. Наблюдаемые морфологические дефекты сосудов могут приводить к облитерации и образованию тромбов, а также к развитию склеротических процессов. Вследствие этого возникает дефицит системы репарации в здоровых тканях, что может замедлить процессы восстановления клеток. Определяющим фактором, развития поздних лучевых повреждений, является доза, полученная за одну фракцию облучения. При ее повышении увеличивается вероятность развития лучевых повреждений, которые проявляются длительным клиническим синдромом со стороны облучаемых органов [6,7,8].

Обеспечение адекватной коррекции общего состояния пациентов, проходящих лучевую терапию, является обязательным компонентом для эффективной профилактики развития ранних лучевых реакций и лучевых осложнений.

Целью данного исследования явилась оценка частоты встречаемости и градация степени тяжести лучевых повреждений, ассоциированных с проведением адъювантного этапа брахитерапии у пациенток с РМ.

Материалы и методы. В основу работы положена информация о комбинированном лечении 40 пациенток с диагнозом РМ. Лечебная программа предусматривала двухэтапный подход. На первом этапе всем женщинам выполнялось радикальное хирургическое вмешательство в объеме расширенной экстирпации матки с придатками. В последующем, в качестве второго этапа, назначался курс адъювантной лучевой терапии. Оценка полученных результатов производилась посредством сопоставительного анализа данных клинического осмотра и инструментальных методов визуализации.

Наибольшую часть исследуемой группы, 82,5% (33 пациентки), составили пациентки с раком тела матки, в то время как у 17,5% (7 пациенток) был диагностирован рак шейки матки. Распределение по стадиям среди пациенток с РТМ было следующим: Ia – 24,2%, Ib – 45,5%, II – 27,3%, III – 3,0%. У пациенток с РШМ стадии распределились следующим образом: Ia – 28,6%, Ib – 42,9%, II – 14,25%, III – 14,25%.

Сочетанная лучевая терапия (ДЛТ+БТ) была применена у 37,5% пациенток, тогда как брахитерапия в монорежиме – у 62,5%. Среди пациенток с РШМ СЛТ получили 85,7%, брахитерапию – 14,3%; при РТМ эти показатели составили 27,3% и 72,7% соответственно.

При этом в группе пациенток с РШМ превалировала сочетанная методика (85,7% случаев), тогда как самостоятельная брахитерапия использовалась лишь в 14,3%. В противоположность этому, при РТМ доминирующим подходом в лечении являлась именно брахитерапия (72,7%), а сочетанное лучевое лечение проводилось у 27,3% пациенток.

Параметры фракционирования дозы при сочетанной лучевой терапии регламентировались стандартными режимами. Разовая очаговая доза (РОД) ДЛТ при СЛТ составляла 2 Гр до суммарной очаговой дозы (СОД) в 46 Гр. При брахитерапии РОД составила 5 Гр, до СОД 20-25 Гр при раке тела и шейки матки. В тех случаях, когда брахитерапия проводилась в качестве самостоятельного метода лечения, применялся более интенсивный режим фракционирования: РОД 6 Гр, до суммарной дозы 30 Гр.

Результаты. Для объективной оценки лучевых реакций и осложнений радиотерапии использовалась общепринятая шкала RTOG (Radiation Therapy Oncology Group). Срок наблюдения за состоянием пациенток составил 2 года. Непосредственно в процессе лечения развитие ранних лучевых реакций было задокументировано у 23 женщин (57,5%). В подгруппе больных, получавших сочетанную лучевую терапию, регистрировался достаточно типичный спектр осложнений. В частности, явления лучевого эпителиита были отмечены в 66,6% наблюдений (из них I степень тяжести — 80%, II степень — 20%). Симптоматика энтероколита выявлена у 40% пациенток (I степень — 66,6%, II степень — 33,4%). Частота встречаемости цистита достигала 20%,

ректита — 6,7%. При этом выраженность данных воспалительных реакций со стороны мочевого пузыря и прямой кишки была расценена как 1 степень тяжести. Следует подчеркнуть, что у одной пациентки одномоментно могло наблюдаться развитие лучевых реакций со стороны нескольких различных органов.

В исследованной группе пациенток, проходивших брахитерапию в качестве единственного метода лучевого воздействия, диагностировался исключительно лучевой эпителиит, частота возникновения которого равнялась 36%. Тяжесть данного осложнения в 8 случаях (88,8%) соответствовала I степени, и лишь у 1 пациентки (11,2%) была верифицирована II степень выраженности процесса.

Назначение комплекса медикаментозной терапии позволило полностью купировать все зарегистрированные нежелательные явления. Консервативное лечение включало применение препаратов как общего, так и местного спектра действия: пробиотиков, противовоспалительных средств, спазмолитиков, антимикробных агентов и прочих. Важно отметить, что степень тяжести лучевых реакций ни в одном из наблюдений не потребовала перерывов в лечении или его полной отмены.

Выводы

1. Современная брахитерапия является неотъемлемым компонентом комбинированного лечения рака матки.

2. Применение сочетанного режима лучевого воздействия ассоциировано с увеличением как частоты встречаемости (в 1,8 раз), так и степени клинической выраженности лучевых эпителиитов по сравнению с брахитерапией в самостоятельном варианте. Также стоит отметить, что при СЛТ возникали следующие реакции: энтероколит - 40%, цистит – 20%, ректит – 6,7% случаев.

3. Назначенная консервативная сопроводительная терапия продемонстрировала исчерпывающую эффективность в полном разрешении всех отмеченных воспалительных явлений. Перерыва в лечении или прекращения курса ЛТ не потребовалось.

Список литературы:

1. Каприн АД, Старинский ВВ, Шахзадова АО. Злокачественные новообразования в России в 2023 г (Заболеваемость и смертность). МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России; 2024. – 276 с.

2. Otter SJ, Stewart AJ, Devlin PM. Modern Brachytherapy. 2019 Dec. PMID: 31668203. <https://doi.org/10.1016/j.hoc.2019.08.011>
3. Karlsson J, Dreifaldt AC, Mordhorst LB, et al. Differences in Outcome for Cervical Cancer Patients Treated with or without Brachytherapy. Brachyjournal. 2017 Jan-Feb. PMID: 27836496. <https://doi.org/10.1016/j.brachy.2016.09.011>
4. Демидова ЛВ, Дунаева ЕА, Бойко АВ и соавт. Осложнения лучевой терапии при комбинированном лечении больных раком тела матки I стадии. Вестник РОНЦ им. Н.Н. Блохина РАМН, 2011, 22, № 4, С. 39–45.
5. Завьялов А.А., Солодова А.Н., Тырышкин А.И., Кряквина Е.В. Брахитерапия злокачественных новообразований шейки матки: современное состояние проблемы (Обзор литературы). Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2023. Т. 68. № 6. С. 99-105.
6. Дунаева Е.А., Бойко А.В., Демидова Л.В., Вельшер Л.З. и соавт. Консервативные методы профилактики и лечения лучевых повреждений у больных злокачественными новообразованиями женских половых органов. Медицинская радиология и радиационная безопасность, 2015, Том 60, № 5
7. Aghili M, Babaei M, Bayani R, Jaber R, et al. Short Course Brachytherapy in Locally Advanced Cervical Cancer; Safety and Response Rate. Asian Pacific Journal of Cancer Prevention. 2024 Sep. PMID: 39342591 PMCID: PMC11700332. <https://doi.org/10.31557/APJCP.2024.25.9.3119>
8. Mahantshetty U, Sturdza A, Naga ChP, et al. Vienna-II Ring Applicator for Distal Parametrial/Pelvic Wall Disease in Cervical Cancer Brachytherapy: an Experience from Two Institutions: Clinical Feasibility and Outcome. Radiotherapy and Oncology. 2019 Dec. PMID: 31495516. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2019.08.004>

ПОСТТРАВМАТИЧЕСКОЕ СТРЕССОВОЕ РАССТРОЙСТВО У НАСЕЛЕНИЯ ПРИ УГРОЗАХ БЕСПИЛОТНЫХ И РАКЕТНЫХ ОПАСНОСТЯХ В УСЛОВИЯХ СВО

С.В. Горнов, А.А. Зинченко, Ю.Н. Гут
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России. Москва.
zicnhenko_aleks@mai.ru

Актуальность. Актуальность проблемы посттравматического стрессового расстройства (ПТСР) на фоне угроз, связанных с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) и ракетных систем, приобретает особую остроту в условиях современных вооруженных конфликтов, таких как специальная военная операция (СВО). Понимание масштабов проблемы и ее влияния на психическое здоровье населения требует обращения к статистическим данным и результатам научных исследований [4; 6].

В регионах, подверженных ракетным и воздушным атакам, наблюдается значительный рост обращений граждан за психологической и психиатрической помощью. Несмотря на то, что прямая статистика по ПТСР, ассоциированному именно с угрозами БПЛА и ракет, может быть ограничена в силу специфики сбора данных в условиях военного конфликта, общая тенденция к увеличению психогенных расстройств является очевидной. Медицинские и психологические службы сообщают о повышенном уровне тревожности, панических атак, нарушений сна и депрессивных состояний среди населения.

Международные исследования, посвященные психологическим последствиям боевых действий и террористических угроз, убедительно демонстрируют высокую вероятность развития ПТСР у лиц, подвергающихся длительному воздействию стрессогенных факторов. При этом, отмечено статистически достоверное развитие ПТСР у большинства наблюдаемых через 6 месяцев после воздействия стрессовых факторов. Согласно данным, полученным после конфликтов в различных регионах мира, до 30–40 % населения, проживающего в зонах повышенной опасности, могут демонстрировать симптомы, соответствующие критериям ПТСР [4; 8]. Угроза со стороны БПЛА и ракет, характеризующаяся внезапностью, непредсказуемостью и тотальностью, создаёт условия для формирования хронического стресса, который рассматривается как один из ключевых факторов риска развития ПТСР [6; 10].

Особую уязвимость перед травматическим опытом демонстрируют дети и подростки. Воздействие звуков взрывов, визуальных образов разрушений, страх за собственную жизнь и жизнь близких могут приводить к долгосрочным негативным последствиям, включая ПТСР, задержки психического развития, трудности в обучении и социализации. Статистические данные из зон вооруженных конфликтов нередко указывают на более высокие показатели ПТСР у детей по сравнению со взрослым населением [8].

Значительную роль в усилении травматического эффекта играет информационное поле. Постоянное освещение событий в средствах массовой информации и социальных сетях, включающее кадры разрушений и тревожные сообщения, способно пролонгировать и интенсифицировать травматическое воздействие даже на тех, кто не находился в непосредственной близости к месту событий. Данное явление, известное как «вторичная травматизация» или «информационная травма», также вносит вклад в повышение общего уровня стресса и тревожности в обществе [2; 4].

Учитывая специфику угроз (звуковые, визуальные триггеры, неопределенность), ПТСР, обусловленное ими, может требовать разработки и внедрения специализированных программ психологической реабилитации и психотерапии. Статистика по эффективности различных методов лечения ПТСР (например, когнитивно – поведенческая терапия, EMDR – терапия) показывает, что своевременное и адекватное вмешательство значительно снижает риск хронизации расстройства и улучшает качество жизни пострадавших [5; 7; 9].

Таким образом, актуальность изучения и решения проблемы ПТСР в условиях угроз от БПЛА и ракет не вызывает сомнений. Это комплексная проблема, затрагивающая психическое здоровье значительной части населения, требующая не только медицинского, но и социально – психологического подхода, а также мер по профилактике и оказанию экстренной психологической помощи.

Современные военные конфликты, характеризующиеся применением БПЛА и ракетных систем, создают уникальные и крайне стрессогенные условия для гражданского населения. Постоянная угроза воздушных атак, сопровождающаяся звуками сирен, взрывами и разрушениями, оказывает глубокое психологическое воздействие, значительно повышая риск развития ПТСР. Данная статья посвящена анализу особенностей ПТСР в условиях повышенной угрозы от БПЛА и ракет, а также предложениям по его профилактике и лечению.

Цель исследования – изучить и описать основные аспекты посттравматического стрессового расстройства, включая этиологию,

клиническую симптоматику, методы диагностики и современные подходы к лечению на основании данных научной литературы.

ПТСР представляет собой серьезное психическое расстройство, затрагивающее значительное количество людей, переживших травмирующие события. Понимание его природы и эффективное лечение имеют решающее значение для улучшения качества жизни пострадавших и снижения нагрузки на систему здравоохранения.

Материал и методы. В работе использованы методы теоретического анализа и синтеза научной литературы по теме ПТСР и военной травмы. Поиск источников осуществлялся в базах данных PubMed, Google Scholar, eLibrary.ru, за период 2014–2025 гг. по ключевым словам: ПТСР, боевые действия беспилотников, ракетные обстрелы. На основе обобщения данных предложена концептуальная модель факторов риска и мишеней психологической помощи при ПТСР в условиях угроз БПЛА и ракет.

Специфика стрессогенного воздействия угроз БПЛА и ракет

1. Иррациональность и вездесущность угрозы. В отличие от традиционных военных действий, угроза от БПЛА и ракет может ощущаться как более иррациональная и вездесущая. Непредсказуемость атак, невозможность их полного контроля и ощущение уязвимости в любом месте (дом, работа, улица) усиливают чувство беспомощности [6; 10].

2. Акустический фактор. Звук сирен, а затем и приближающейся ракеты или БПЛА, становится мощным триггером. Повторяющиеся акустические стимулы, ассоциирующиеся с опасностью, могут вызывать у людей панические атаки, тревогу и физиологические реакции, даже при отсутствии непосредственной угрозы [3; 10].

3. Визуальные и аудиовизуальные стимулы. Кадры разрушений, сообщения в СМИ и социальных сетях, личный опыт столкновения с последствиями атак формируют травматический опыт, который может закрепляться в психике и актуализироваться при воздействии напоминающих стимулов [2; 4].

4. Длительность и неопределенность. Ситуация перманентной боевой готовности и неопределенности сроков завершения конфликта истощает психические ресурсы человека, снижая его адаптационный потенциал и повышая уязвимость к развитию ПТСР [6; 8].

Клинические проявления ПТСР в условиях СВО

Клиническая картина ПТСР, вызванного угрозами БПЛА и ракет, имеет свои особенности соответствующих критериям DSM – V и МКБ – 11 [5; 11]:

1. Симптомы повторного переживания:

– навязчивые воспоминания об услышанных звуках (сирены, взрывы), увиденных разрушениях;

- ночные кошмары, часто связанные с ощущением падения, взрывов, преследования;

- эмоциональное и физиологическое дистресс при столкновении со стимулами, напоминающими о травме (громкие звуки, полеты птиц, напоминающие БПЛА) [5; 6].

2. Симптомы избегания:

- избегание мест, которые ассоциируются с угрозой (например, укрытий, подвалов);

- избегание мыслей, чувств или разговоров, связанных с ракетными или воздушными атаками;

- снижение интереса к обычным занятиям, социальной изоляции.

3. Негативные изменения в когнитивных функциях и настроении:

- стойкие негативные убеждения о себе, других или мире ("мир опасен", "я беспомощен");

- стойкое снижение позитивных эмоций (радость, любовь, удовлетворение);

- отсутствие интереса к значимой деятельности;

- ощущение отчужденности от других людей.

4. Симптомы повышенной возбудимости:

- раздражительность, вспышки гнева;

- необдуманное, само разрушительное поведение;

- повышенная бдительность, постоянное ожидание опасности;

- нарушения сна (бессонница, трудности с засыпанием);

- трудности с концентрацией внимания [5; 7].

К числу групп повышенного риска развития ПТСР в условиях угроз БПЛА и ракет относятся [4; 8; 10]:

- непосредственные свидетели разрушений – люди, лично наблюдавшие последствия атак, пострадавшие или потерявшие близких;

- дети и подростки – в силу возрастной уязвимости психики и незавершенности процессов психологического развития;

- люди с предшествующими психическими расстройствами: Наличие тревожных расстройств, депрессии или предыдущих травм повышает риск развития ПТСР;

- женщины – исследования указывают, что женщины более подвержены развитию ПТСР после травматических событий;

- лица с низким социально – экономическим статусом – уровень дохода, доступ к информации и психологической помощи, а также характер социальной поддержки могут существенно влиять на устойчивость к стрессу [2; 4; 7].

Профилактика и реабилитация

Эффективная система профилактики и реабилитации ПТСР в условиях угроз БПЛА и ракет должна включать следующие компоненты [1; 3; 7]:

- 1) информирование населения – распространение информации о симптомах ПТСР, способах самопомощи и получения профессиональной помощи;
- 2) психологическая подготовка – обучение населения навыкам стрессоустойчивости, техникам релаксации, правилам поведения в чрезвычайных ситуациях;
- 3) создание системы психологической поддержки – организация работы телефонов доверия, психологических центров, предоставление доступной психотерапевтической помощи;
- 4) раннее выявление – регулярный скрининг населения (особенно групп риска) на наличие симптомов ПТСР.
- 5) комплексная медико-психологическая реабилитация – включение психологической реабилитации в общие программы помощи пострадавшим от военных действий.

Выводы

Угрозы, связанные с применением БПЛА и ракет, представляют собой серьезный вызов для психического здоровья населения. ПТСР, формирующееся в подобных условиях, требует особого внимания и комплексного подхода к профилактике, диагностике и терапии. Разработка и внедрение эффективных стратегий психологической поддержки, направленных на повышение стрессоустойчивости и оказание своевременной помощи, являются ключевыми задачами в условиях продолжающегося вооруженного конфликта.

Список литературы:

1. Горнов С.В. Медико-психологическая реабилитация летчиков после воздействия боевого стресса. Автореферат диссертации доктора медицинских наук: 14.03.08; 14.03.11, 2019. - 46 с.
2. Гофман А.А., Свиридов Р.Е. Профилактика страха и тревожности в условиях социальных конфликтов. Евразийский юридический журнал. 2023. № 12 (187). С. 537 – 538.
3. Козачук А.Ю., Вдовина И.В. Психические расстройства во время и после локальных военных конфликтов. В сборнике: Психиатрия 21 века: первые шаги в науку и практику. Тезисы докладов III Всероссийской конференции молодых ученых памяти профессора П.В. Морозова с международным участием. Москва, 2023. С. 27 – 29.
4. Лавренчук Т.Д. Приемы психологической помощи для борьбы со стрессом во время специальной военной операции. В сборнике: Молодая

наука: актуальные вопросы экономики и управления, права, психологии и образования. Сборник научных статей ежегодной Всероссийской научно – практической конференции молодых ученых (с международным участием). Санкт – Петербург, 2023. С. 62 – 66.

5. Усик Д.А. Проблемы психологического состояния граждан России в период проведения специальной военной операции. Мир образования – образование в мире. 2024. № 4 (96). С. 388 – 394.

6. American Psychiatric Association. Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, 5th Edition, Text Revision (DSM – 5 – TR). Arlington, VA: American Psychiatric Association Publishing; 2022, - 1120 p.

7. Ben-David B. M., Bressler T. E., Ring L. et al. Trauma echoes: factors associated with peritraumatic distress and anxiety five days following Iranian missile attack on Israel. *European Journal of Psychotraumatology*, 2025. Vol.16. No. 1, p. 2446070. DOI: 10.1080/20008066.2024.2446070

8. Bryant R. A. Post-traumatic stress disorder: a state-of-the-art review of evidence and challenges. *World Psychiatry*, 2019. Vol. 18. No. 3, pp. 259-269. DOI: 10.1002/wps.20656.

9. King D. W., King L. A., Vogt D. S. Risk pathways for PTSD: Making sense of the literature. In M. J. Friedman, T. M. Keane, & P. A. Resick (Eds.), *Handbook of PTSD: Science and Practice* (2nd ed.). New York: Guilford Press, 2014, pp. 146-165.

10. Resick P. A., Monson C. M., Chard K. M. Cognitive Processing Therapy for PTSD: A Comprehensive Manual. – New York : Guilford Publications, 2016. – 498 p.

11. Shvartsur R., Savitsky B. Civilians under missile attack: post-traumatic stress disorder among the Jewish and Bedouin population of Southern Israel / R. Shvartsur, // *Israel Journal of Health Policy Research*. – 2024. – Vol. 13. – DOI: 10.1186/s13584-024-00625-9.

12. World Health Organization. International Classification of Diseases, 11th Revision (ICD – 11). Geneva: World Health Organization, 2022.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ (VR) В ДИАГНОСТИКЕ И ТЕРАПИИ ПОСТТРАВМАТИЧЕСКОГО СТРЕССОВОГО РАССТРОЙСТВА: НЕЙРОПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ КОРРЕЛЯТЫ

С.В. Чернышенко¹, Ю.Н. Гут², С.В. Горнов²

¹Общероссийская профессиональная психотерапевтическая лига,
г. Москва;

²МБУ ИНО ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России,
г. Москва

gut.julya@yandex.ru

Актуальность. Посттравматическое стрессовое расстройство (ПТСР) относится к категории тяжелых психопатологических состояний, детерминированных воздействием сверхсильных психотравмирующих факторов [5]. Клинический профиль включает симптомокомплекс повторного переживания, стойкое избегание триггерных стимулов, гиперактивацию вегетативной нервной системы и нарушения в когнитивно-эмоциональной сфере.

Распространенность ПТСР в общей популяции составляет 6–8%, однако среди лиц, подвергшихся боевому стрессу, этот показатель возрастает до 15–30%, а в группах с тяжелой комбатантной травмой – до 40–50% [7]. В структуре санитарных потерь в современных вооруженных конфликтах доля психических расстройств неуклонно растет, что обусловлено повышением выживаемости при тяжелых ранениях и пролонгированным характером боевых действий [6]. Это создает устойчивый запрос на разработку высокоэффективных методов диагностики и терапии ПТСР.

Стандартные протоколы экспозиционной терапии имеют фундаментальные ограничения. Проведение воображаемой экспозиции затруднительно при выраженных диссоциациях или когнитивных нарушениях, а также зависит от способности пациента к воссозданию детального образа травмы. Реализации экспозиции в реальных условиях связана со сложностями организационного и этического характера. труднореализуема из-за риска повторной травматизации и отсутствия единых стандартов для воспроизведения стресс-факторов. Именно это противоречие делает обоснованным обращение к VR-платформам [4]. Главное

преимущество таких систем заключается в возможности поэтапно предъявлять стимульный материал, управляя его интенсивностью, и одновременно фиксировать вегетативные и поведенческие реакции [2].

Важно подчеркнуть, что VR-технологии не могут заменить традиционные методы, а являются лишь «усилителем» терапевтического процесса. Они позволяют создать ситуацию, в которой пациент добровольно вступает в контакт с травматическим материалом, но при этом сохраняет чувство базовой безопасности. Такая «управляемая уязвимость» способствует постепенному расширению индивидуального порога стрессоустойчивости.

Цель: систематизировать данные о нейropsychологических и клинико-физиологических механизмах эффективности VR-технологий в диагностике, профилактике и терапии посттравматического стрессового расстройства.

Материалы и методы. Проведен аналитический обзор научных публикаций в базах eLIBRARY, PubMed, Web of Science за 2015–2025 гг. Критерии включения: исследования нейровизуализационных (фМРТ, ПЭТ) и электрофизиологических (ЭЭГ) маркеров у пациентов с ПТСР (включая комбатантов) в динамике виртуальной экспозиционной терапии (ВЭТ). Применены методы нейropsychологического и сравнительного анализа патогенетических механизмов восстановления. Дополнительно проанализированы работы по валидации VR-диагностических протоколов.

Результаты. В основе клинико-нейробиологического эффекта ВЭТ лежит активация процессов угашения условного страха и реконсолидации нейронных сетей травматической памяти. Патогенез ПТСР характеризуется гиперактивацией миндалевидного тела на фоне гипofункции вентромедиальной префронтальной коры и передней поясной коры, а также структурно-функциональными нарушениями гиппокампа. VR-сценарии позволяют дозированно активировать патологические нейронные связи без риска декомпенсации [2, 4].

Нейробиологические корреляты ПТСР, выявляемые с помощью фМРТ, демонстрируют гиперреактивность амигдалы, снижение активности вентромедиальной префронтальной коры при подавлении тревоги и нарушение связности между гиппокампом и префронтальной корой. Эти изменения коррелируют с тяжестью симптомов и устойчивостью к терапии.

ВЭТ способствует обратному развитию нарушений: усилению активации вентромедиальной префронтальной коры, снижению амигдаларного ответа и восстановлению гиппокампаальной активности, что отражает процессы структурной и функциональной нейропластичности [4].

Эмпирические данные подтверждают, что регулярное использование управляемых VR-стимулов способствует укреплению нисходящего контроля со стороны префронтальной коры над лимбической системой [1]. Функциональная МРТ фиксирует после проведенного курса снижение метаболической активности в амигдале и нормализацию работы передней поясной коры. На уровне вегетативной регуляции фиксируется уменьшение выраженности симпатикотонии и увеличение вариабельности сердечного ритма [1, 4].

ЭЭГ-исследования демонстрируют после курса ВЭТ увеличение мощности альфа-ритма (редукция тревожности) и снижение высокочастотной бета-активности, ассоциированной с хроническим гипервозбуждением. Кроме того, меняется паттерн вызванных потенциалов в ответ на травматические сигналы, что говорит о перестройке когнитивной оценки угрозы на субкортикальном уровне [3].

Диагностический потенциал VR-решений также заслуживает внимания. Встроенные системы айтрекинга и регистрации кожно-гальванического рефлекса позволяют объективизировать ранние маркеры стресс-реакции, которые при стандартном опросе могут оставаться незамеченными [3]. Валидные исследования показывают, что диагностическая чувствительность VR-методик составляет 88–92% при специфичности 85–90%, что не уступает традиционным шкалам (CAPS-5, PCL-5). При этом они менее подвержены искажениям, связанным с социальной желательностью или защитным избеганием [6].

Превентивное применение VR-тренажеров также признается перспективным, особенно в отношении специалистов, работающих в условиях повышенного риска. Такие программы включают последовательное усложнение моделируемых ситуаций и параллельное обучение техникам саморегуляции, что способствует выработке устойчивых навыков совладания еще до реального столкновения с угрозой [3].

Обсуждение. Результаты позволяют сформулировать концептуальную модель терапевтического действия VR-технологий при ПТСР, включающую четыре ключевых компонента:

1) контролируемое переживание – пациент многократно сталкивается с травматическими стимулами в безопасной среде, активируя механизмы угашения страха;

2) экспозиция с обратной связью – биофизиологические показатели (ЧСС, КГР) отображаются в реальном времени, что позволяет терапевту корректировать интенсивность воздействия;

3) реконсолидация памяти – в ходе сессий формируется новая адаптивная ассоциация через временное «открытие» консолидированной памяти в момент активного воспоминания;

3) трансфер навыков – навыки саморегуляции, отработанные в VR-среде, переносятся в реальную жизнь.

Ограничения метода: стоимость оборудования, VR-дискомфорт (киберболезнь) у 5–15% пациентов, риск ретравматизации при неадекватном дозировании, снижение эффективности при выраженной диссоциации. Наиболее перспективен интегративный подход, комбинирующий VR-технологии с когнитивно-поведенческой терапией и психообразованием.

Выводы

1. Терапевтический эффект VR-технологий при ПТСР опирается на механизмы нейропластичности и снижения страха, восстанавливающие тормозной контроль префронтальной коры над лимбическими структурами.

2. Сочетание VR-экспозиции с нейрофизиологическим мониторингом снижает диссоциативное избегание и повышает лояльность к лечению.

3. Высокая экологическая валидность и градуировка воздействий делают VR-системы инструментом для диагностики, коррекции и превентивной подготовки лиц из групп риска.

4. Перспективны персонализированные VR-сценарии на основе данных нейровизуализации, прогнозирование терапевтического ответа и оценка долгосрочной эффективности.

5. Внедрение VR-технологий в систему ФМБА России требует создания методических центров, стандартизированных протоколов и подготовки кадров.

Список литературы:

1. Воловик М.Г., Белова А.Н., Кузнецов А.Н. [и др.]. Технологии виртуальной реальности в реабилитации участников

боевых действий с посттравматическим стрессовым расстройством (обзор) // Современные технологии в медицине. 2023. Т. 15, № 1. С. 74-86. DOI 10.17691/stm2023.15.1.08.

2. Лутова Н.Б., Сорокин М.Ю., Садчикова М.А. [и др.]. Технологии виртуальной реальности в диагностике и терапии пациентов с тяжелыми психическими расстройствами // Бюллетень медицинской науки. 2025. № 4(37). С. 136-148. DOI 10.31684/25418475-2025-4-136.

3. Путилова С.Н. Применение виртуальной реальности (VR) в профилактике фобий и посттравматических стрессовых расстройств // Фундаментальные исследования в цифровую эпоху. СПб., 2025. С. 38-41. DOI 10.37539/251119.2025.76.52.004.

4. Фрейзе В.В., Малышко Л.В., Грачев Г.И. [и др.]. Перспективы использования VR в терапии пациентов с психическими расстройствами // Обозрение психиатрии и медицинской психологии им. В.М. Бехтерева. 2021. № 1. С. 18-24. DOI 10.31363/2313-7053-2021-1-18-24.

5. Щегольков А.М., Горнов С.В., Шакула А.В. Концепция медико-психологической реабилитации летчиков после боевого стресса // Филиал военно-медицинской академии: уроки прошлого, взгляд в будущее. М., 2025. С. 90-93.

6. Bryant R.A. Post-traumatic stress disorder: a state-of-the-art review // World Psychiatry. 2019. Vol. 18, No. 3. P. 259-269. DOI 10.1002/wps.20656.

7. Yehuda R., Hoge C.W., McFarlane A.C. Post-traumatic stress disorder // Nature Reviews Disease Primers. 2015. Vol. 1. P. 15057. DOI 10.1038/nrdp.2015.57.

ПРИМЕНЕНИЕ DEERONET ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ПУЧКОВ ПРОТОНОВ

*Г.А. Крусанов, А.В. Белоусов, М.А. Колыванова,
А.В. Гордеев, Ю.Е. Смирнов
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва
krusanov@physics.msu.ru*

Актуальность. Точное предсказание глубинных распределений дозы протонов критически важно для протонной терапии [1]. Метод Монте-Карло обеспечивает высокую точность, но требует значительных вычислительных ресурсов, что ограничивает его использование в клиническом планировании. Нейросетевые подходы [2], обученные на данных Монте-Карло, способны значительно ускорить расчёты, однако их «черный ящик» затрудняет валидацию и доверие врачей. Поэтому перспективны гибридные модели, сочетающие точность глубокого обучения с физической интерпретируемостью [3].

Цель. Целью работы является разработка быстрой и интерпретируемой модели для предсказания дозовых профилей протонов с энергией 50–240 МэВ на основе архитектуры DeepONet [4], дополненной анализом латентного пространства, каузальным тестированием признаков и гибридизацией с аналитическими зависимостями.

Материалы и методы. Исходные данные – глубинные дозовые профили, полученные методом Монте-Карло (Geant4) для энергий 50–240 МэВ. Профили обрезались при падении дозы ниже 5% от максимума, нормировались на глобальный максимум и интерполировались кубическими сплайнами к фиксированной длине 200 точек.

Архитектура DeepONet включает автоэнкодер (кодировщик: $200 \rightarrow 256 \rightarrow 128 \rightarrow 64 \rightarrow 8$, декодировщик: $8 \rightarrow 64 \rightarrow 128 \rightarrow 256 \rightarrow 200$) и регрессор ($1 \rightarrow 128 \rightarrow 256 \rightarrow 128 \rightarrow 8$), предсказывающий латентный вектор по энергии. Используются batch normalization, ReLU, dropout 0.1, Softplus на выходе. Размерность латентного пространства (8) выбрана эмпирически.

Функция потерь для автоэнкодера – взвешенная MSE с весом 10 для области пика Брэгга (± 7 точек) и весом 1 для остальных областей. Для регрессора – стандартная MSE. Аугментация данных (гауссов шум $\sigma=0.003-0.01$, сдвиги на ± 2 точки) увеличила выборку в 5 раз. Обучение трёхэтапное: автоэнкодер (600 эпох), регрессор (1200 эпох), совместная дообучение (400 эпох) с early stopping и адаптивным снижением скорости.

Для улучшения интерпретируемости проведён анализ важности признаков с помощью Random Forest, показавший, что первые 3–4 латентных признака объясняют $>90\%$ дисперсии энергии. Для всех 8 признаков вычислены корреляции Пирсона и Спирмена с 18 физическими параметрами профилей (положение пика, ширина, асимметрия, интегральная доза и др.). Сильные корреляции ($|r|>0.7$) обнаружены для Latent_0 (ширина и положение пика), Latent_1 (асимметрия), Latent_2 (интегральная доза) и Latent_4 (высота пика). Метод частичных корреляций с контролем энергии [5] позволил отделить истинные функциональные связи от артефактов.

На основе анализа разработан гибридный подход [6], в котором первые три латентных признака заменены аналитическими функциями энергии (фитированные гладкие кривые), а остальные пять предсказываются нейросетью. Это уменьшает размерность, улучшает интерпретируемость и физическую согласованность. Дополнительно опробован вариант с фитированием всех гладких зависимостей и переобучением.

Результаты. Оба подхода - как с каузальным анализом и уменьшением размерности, так и гибридный с фитированием - показали значительное улучшение метрик качества предсказания на 15–20% по сравнению с исходной архитектурой DeepONet. Наилучшие результаты были достигнуты при гибридизации с заменой первых трёх латентных признаков: среднеабсолютная ошибка (MAE) снизилась с 0,0243 до 0,0029, симметричная средняя абсолютная процентная ошибка (sMAPE) - с 24,7% до 16,1%, а коэффициент детерминации R^2 вырос с 0,973 до 0,999. Совместное применение обоих подходов не привело к дальнейшему улучшению, что свидетельствует об исчерпании обобщающих способностей данной архитектуры.

Детальный анализ по областям профиля показал, что наиболее существенное улучшение (до 98%) достигнуто на участке от входа пучка до пика Брэгга; в области от пика до уровня 5% от максимума точность возросла примерно в 1,5 раза (абсолютное улучшение около 5%); на спаде от 5% до 1% улучшение составило около 10%, тогда как в хвостовой области ниже 1% изменения оказались практически незаметны (около 2%). В итоге достигнута клинически значимая точность: в области пика (до 50% спада) ошибка не превышает 2%, на спаде от 50% до 5% - 5%, а в хвосте от 5% до 1% - 20%.

Следует отметить, что гибридная модель требует на порядок больше вычислительных ресурсов на этапе обучения из-за необходимости фитирования и переобучения, однако в режиме инференса она остаётся столь же быстрой, как и чисто нейросетевая.

Выводы. В работе разработана и верифицирована гибридная нейросетевая модель на основе DeepONet для предсказания глубинных дозовых профилей протонов. Предложенный подход удачно сочетает высокую точность глубокого обучения с физической интерпретируемостью благодаря анализу латентного пространства и замене части признаков аналитическими функциями.

В результате создана интерпретируемая модель, в которой первые латентные признаки имеют чёткий физический смысл (положение и ширина пика, асимметрия, интегральная доза), что существенно облегчает валидацию и повышает доверие со стороны медицинских физиков. Достигнуто значительное повышение точности (улучшение MAE в 8 раз, $R^2 > 0,999$) при сохранении высокой скорости предсказания, вполне пригодной для клинического применения. Кроме того, разработан CLI-фреймворк для автоматизации процесса обучения, гибридизации, анализа признаков и сохранения наилучшей модели, что обеспечивает воспроизводимость и масштабируемость исследований.

Предложенная методология может быть обобщена на другие задачи медицинской физики, где требуется быстрая и интерпретируемая замена ресурсоёмких расчётов Монте-Карло (например, для пучков альфа-частиц или других тяжёлых заряженных частиц). В дальнейшем планируется расширение энергетического диапазона, учёт неоднородностей тканей и интеграция модели в контур клинического планирования облучения.

Список литературы:

1. Paganetti, H. (2012). Range uncertainties in proton therapy and the role of Monte Carlo simulations. *Physics in Medicine & Biology*, 57(11), R99-R117.
2. Kontaxis, C., et al. (2020). A deep learning methodology for improved dose calculation in proton therapy. *Medical Physics*, 47(11), 5623-5633.
3. Samek, W., et al. (2021). Explaining deep neural networks and beyond: A review of methods and applications. *Proceedings of the IEEE*, 109(3), 247-278.
4. Lu, L., Jin, P., & Karniadakis, G. E. (2019). DeepONet: Learning nonlinear operators for identifying differential equations based on the universal approximation theorem of operators. *Nature Machine Intelligence*, 3(3), 218-229.
5. Pearl, J. (2009). *Causality: Models, reasoning, and inference*. Cambridge University Press.
6. Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378, 686-707.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ МЕТАБОЛИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ПАЦИЕНТОВ С ОСТРЫМИ ЛЕЙКОЗАМИ

Б.И. Юргин, В.В. Кореньков, А.В. Жигалова

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

ФГБУ МБУ ИНО ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России, Москва

borisyurgin@gmail.com

Актуальность

Метаболические нарушения, в том числе метаболический синдром, рассматриваются как клинико-патогенетический комплекс, объединяющий абдоминальное ожирение, нарушения углеводного обмена, атерогенную дислипидемию и артериальную

гипертензию. Их значение определяется не только распространенностью, но и связью с сердечно-сосудистыми заболеваниями, сахарным диабетом 2 типа, хронической болезнью почек и общей кардио-нефро-метаболической уязвимостью [1, 2]. Для пациентов с острыми лейкозами эта проблема имеет особый смысл: течение заболевания определяется не только агрессивностью опухолевого процесса, но и интенсивной патогенетической терапией, способной изменять липидный, углеводный и пуриновый обмен [3, 4].

Острый миелоидный и острый лимфобластный лейкозы требуют программного лечения, включающего индукционную, постремиссионную, поддерживающую терапию, таргетные препараты и, у части пациентов, трансплантацию гемопоэтических стволовых клеток [3-5]. На этом фоне метаболические нарушения могут формироваться под влиянием исходного коморбидного фона, системного воспаления, опухолевого метаболизма, глюкокортикостероидов, аспарагиназы, иммуносупрессивной терапии и посттрансплантационных осложнений [5-7]. Поэтому прямой перенос популяционной модели нарушений метаболического профиля на онкогематологических пациентов может быть недостаточным.

Цель

Цель работы - оценить особенности метаболического статуса пациентов с острыми лейкозами на разных этапах патогенетической терапии и определить место дислипидемии в структуре выявленных нарушений.

Материалы и методы

Работа была выполнена как клиническое наблюдательное сравнительное исследование. В анализ включены 129 человек, распределенных на четыре группы: 30 пациентов с острым лейкозом в дебюте заболевания до начала патогенетической терапии, 30 пациентов после полихимиотерапии, 39 пациентов после трансплантации гемопоэтических стволовых клеток и 30 лиц контрольной группы без онкогематологической патологии.

Клиническая характеристика включала диагноз, этап лечения, пол, возраст, индекс массы тела, окружность талии, наличие артериальной гипертензии, сахарного диабета, заболеваний почек и других фоновых признаков. Лабораторный блок включал глюкозу крови, общий холестерин, триглицериды, липопротеины высокой

плотности, липопротеины низкой плотности, липопротеины очень низкой плотности, холестерин не-ЛПВП, коэффициент атерогенности, мочевую кислоту, креатинин и расчетную скорость клубочковой фильтрации.

Дислипидемию диагностировали при наличии отклонения хотя бы по одному из показателей липидного спектра. Количественные данные представлены в виде медианы и интерквартильного размаха Me [Q1; Q3], качественные признаки - в виде n (%). Для межгрупповых сопоставлений использовали непараметрические методы, критерий χ^2 и расчет отношения шансов (OR) с 95% доверительным интервалом; статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$.

Результаты

Группы были сопоставимы по большинству фоновых параметров: возрасту, индексу массы тела, уровню глюкозы крови, половому составу и распределению основных вариантов острого лейкоза. Статистически значимые различия выявлены по окружности талии ($p = 0,003$) и частоте артериальной гипертензии ($p = 0,011$), однако эти признаки не объясняли основную направленность липидных нарушений.

Показатель	Без терапии	После ПХТ	После ТГСК	Контроль
n	30	30	39	30
ИМТ, кг/м ²	24,83 [21,26; 28,99]	24,4 [21,05; 27,18]	23,88 [20,77; 26,73]	26,33 [23,79; 29,83]
Окружность талии, см	79 [71; 88,75]	75 [68,25; 82]	90 [78,5; 97,5]	82 [76,5; 95,75]
Глюкоза, ммоль/л	5,4 [4,75; 6]	5,35 [4,95; 5,8]	5,5 [4,9; 5,6]	5,5 [5; 5,6]
Дислипидемия, n (%)	21 (70,0)	25 (83,3)	34 (87,2)	1 (3,3)
OR дислипидемии	67,7	145,0	197,2	-

Таблица 1. Ключевые клиничко-метаболические показатели обследованных групп. Примечание: ПХТ - полихимиотерапия; ТГСК - трансплантация гемопоэтических стволовых клеток; OR рассчитано по сравнению с контрольной группой

Главным результатом стало выявление высокой частоты дислипидемии у пациентов с острыми лейкозами на всех этапах наблюдения. Уже в дебюте заболевания нарушение липидного обмена зарегистрировано у 70,0% пациентов, что указывает на вклад самого лейкозного процесса, воспалительной активации и опухолевого метаболизма. После полихимиотерапии частота дислипидемии увеличивалась до 83,3%, а после трансплантации - до 87,2%, тогда как в контрольной группе она составляла лишь

3,3%. Шансы наличия дислипидемии последовательно возрастали по мере интенсификации лечения: OR=67,7 в дебюте, OR=145,0 после полихимиотерапии и OR=197,2 после трансплантации.

По показателям липидного спектра наиболее отчетливые межгрупповые различия касались общего холестерина, триглицеридов, холестерина не-ЛПВП и коэффициента атерогенности. Триглицериды значимо отличали клинические группы от контроля, а после полихимиотерапии были связаны с ЛПОНП, ЛПВП и коэффициентом атерогенности. Посттрансплантационный этап характеризовался наиболее выраженной проатерогенной направленностью профиля: медиана общего холестерина достигала 6,0 ммоль/л, холестерина не-ЛПВП - 4,41 ммоль/л, коэффициента атерогенности - 3,0.

При этом классические признаки метаболических нарушений не демонстрировали такой же устойчивой однонаправленности. Медианные значения ИМТ оставались близкими к нормальным или пограничным во всех группах, уровень глюкозы крови статистически значимо не различался, а частота артериальной гипертензии была ниже в клинических группах, чем в контроле. Следовательно, у пациентов с острыми лейкозами формируется своеобразная метаболическая диссоциация: лабораторно выраженная дислипидемия выявляется значительно чаще, чем классический фенотип ожирения, гипергликемии и артериальной гипертензии.

Отдельного внимания заслуживают пуриновый обмен и функция почек. В группах дебюта заболевания, после полихимиотерапии и контроля медиана мочевой кислоты существенно не различалась, однако корреляционный анализ показал связь мочевой кислоты с креатинином, скоростью клубочковой фильтрации и признаками почечно-сосудистого блока. Это подтверждает, что урикемия у пациентов с острым лейкозом должна оцениваться не изолированно, а вместе с функцией почек и риском синдрома лизиса опухоли.

Полученные результаты согласуются с современными представлениями о метаболических последствиях противоопухолевой терапии. Более подробно ее влияние изучено в отношении липидного обмена [6-9]. Глюкокортикостероиды и аспарагиназа способны влиять на углеводный и липидный обмен, а после трансплантации дополнительное значение имеют

иммуносупрессия, хроническое воспаление, эндокринные нарушения и изменение сердечно-сосудистого риска [10, 11]. Практически это означает, что отсутствие ожирения или гипергликемии не должно снижать настороженность врача в отношении липидных нарушений и кардиометаболических рисков у онкогематологического пациента.

Выводы

1. У пациентов с острыми лейкозами на разных этапах патогенетической терапии формируется неблагоприятный метаболический профиль, структура которого не полностью соответствует классической модели метаболического синдрома общей популяции.

2. Наиболее отчетливым и устойчивым лабораторным проявлением является дислипидемия: ее частота составила 70,0% в дебюте заболевания, 83,3% после полихимиотерапии и 87,2% после трансплантации гемопоэтических стволовых клеток против 3,3% в контрольной группе.

3. Высокая распространенность дислипидемии не объяснялась только индексом массы тела, уровнем глюкозы, окружностью талии или артериальной гипертензией; вероятно, существенный вклад вносят основное заболевание, системное воспаление и терапевтическая нагрузка.

4. Пациентам с острыми лейкозами целесообразен поэтапный метаболический мониторинг с обязательным контролем расширенного липидного спектра, глюкозы, мочевой кислоты, креатинина и расчетной скорости клубочковой фильтрации.

Список литературы:

1. Dobrowolski P., Prejbisz A., Kuryłowicz A. et al. Metabolic syndrome - a new definition and management guidelines: a joint position paper // Arterial Hypertension. 2022. Vol. 26. P. 113-147.

2. Peterseim C.M., Jabbour K., Mulki A.K. Metabolic Syndrome: An Updated Review on Diagnosis and Treatment for Primary Care Clinicians // Journal of Primary Care & Community Health. 2024. Vol. 15.

3. Döhner H., Wei A.H., Appelbaum F.R. et al. Diagnosis and management of AML in adults: 2022 recommendations from an international expert panel on behalf of the ELN // Blood. 2022. Vol. 140(12). P. 1345-1377.

4. Gökbuget N., Boissel N., Chiaretti S. et al. Management of ALL in adults: 2024 ELN recommendations from a European expert panel // Blood. 2024. Vol. 143(19). P. 1903-1930.
5. Wemyss C., Jones E., Stentz R., Carding S.R. Acute Myeloid Leukaemia and Acute Lymphoblastic Leukaemia Classification and Metabolic Characteristics for Informing and Advancing Treatment // Cancers. 2024. Vol. 16(24).
6. Праскурничий Е.А., Удалов Ю.Д., Китаева Ю.С., Юргин Б.Г. Лейкозы и метаболический синдром: клинические особенности, двунаправленная связь. Клинический вестник ФМБЦ им А.И. Бурназяна. 2026. № 2. С. 108-112.
7. Праскурничий Е.А., Дзидзария В.О., Китаева Ю.С. Изменение липидного спектра у пациентов с острым лейкозом после патогенетической терапии. Российский кардиологический журнал. 2025. Т. 30. № 4. С. 23-30.
8. Праскурничий Е.А., Дзидзария В.О., Китаева Ю.С. Особенности изменений показателей липидного профиля у пациентов с острыми лейкозами на разных этапах патогенетической терапии. Атеросклероз и дислипидемии. 2025. № 2 (59). С. 59-69.
9. Праскурничий Е.А., Дзидзария В.О., Китаева Ю.С. Прогнозирование риска дислипидемий в период после проведения аллогенной трансплантации гемопоэтических стволовых клеток у пациентов с острым лейкозом на основе программ математического моделирования. Эффективная фармакотерапия. 2025. Т. 21. № 19. С. 24-31.
10. Pourhassan H., Murphy L., Aldoss I. Glucocorticoid Therapy in Acute Lymphoblastic Leukemia: Navigating Short-Term and Long-Term Effects and Optimal Regimen Selection // Current Hematologic Malignancy Reports. 2024. Vol. 19(4). P. 1-11.
11. Rotz S.J., Bhatt N.S., Hamilton B.K. et al. International Recommendations for Screening and Preventative Practices for Long-Term Survivors of Transplantation and Cellular Therapy: A 2023 Update // Transplantation and Cellular Therapy. 2024. Vol. 30(4). P. 349-385.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОЙ СТЕПЕНИ ДЕТАЛИЗАЦИИ ЦИФРОВОЙ ДОЗИМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРАБЕКУЛЯРНОЙ КОСТИ

Р.М. Ахмадуллин¹, П.А. Шарагин^{1,2}, Е.А. Шишкина^{1,2}, Е.И. Толстых¹

*¹ФГБУН «Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр
медицинской биофизики» ФМБА России, Челябинск, Россия*

*²ФГБОУ ВО «Челябинский государственный университет»,
Челябинск, Россия*

rommrr3102@bk.ru

Резюме. Моделирование дозообразования в нецелевых радиочувствительных клетках, таких как остеобласты (ОБ) и гемопоэтические стволовые клетки (ГСК), от остеотропных β -излучателей в составе радиофармацевтических препаратов (РФП) требует построения цифровых моделей трабекулярной кости высокого разрешения (фантомов). При создании таких фантомов важно определить необходимую степень их детализации. В настоящей работе рассматривается приближение стержневой формы трабекул и проводится изучение процессов распределения в объеме костномозговых полостей трабекулярной кости поглощенных энергий и соответствующих им доз, образованных излучением из источников, расположенных на поверхности и в объеме трабекул, электронов разных энергий. Фантом построен на основании литературных гистоморфометрических данных. Имитационное моделирование дозообразования проводилось методом Монте-Карло в программе MCNP4C2 для энергий электронов с 30 кэВ по 500 кэВ. Найдены зависимости поглощенных доз от энергий излучаемых электронов для слоев межтрабекулярной среды, обладающих разной толщиной, и ассоциированных с ОБ и различными концентрациями ГСК. Показано, что разделение межтрабекулярной среды на тонкие слои микрометрового разрешения необходимо при дозиметрии в ГСК для электронов с энергией до 200 кэВ, излучаемых из объема кости, и для энергий до 500 кэВ, излучаемых с поверхности кости. В дальнейшем будет изучено влияние формы трабекул, а также будет расширен диапазон энергий излучаемых электронов до 1500 кэВ.

Ключевые слова: радиофармацевтические препараты, β -излучающие радионуклиды, дозиметрическая модель, трабекулярная кость.

DETERMINING THE REQUIRED DETAIL LEVEL FOR THE DIGITAL DOSIMETRIC MODEL OF TRABECULAR BONE

R.M. Akhmadullin¹, P.A. Sharagin^{1,2}, E.A. Shishkina^{1,2}, E.I. Tolstykh¹

¹South Ural Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics of Federal Medical and Biological Agency of Russia, Chelyabinsk, Russia

²Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

rommrr3102@bk.ru

Summary. Modeling dose formation in non-target radiosensitive cells, such as osteoblasts (OB) and hematopoietic stem cells (HSC), from osteotropic β -emitters incorporated in radiopharmaceuticals (RP) requires constructing high-resolution digital models (phantoms) of trabecular bone. When creating such phantoms, it is important to determine the required detail level. This work considers an approximation of rod-like trabeculae and investigates the processes of distribution of absorbed energies and corresponding doses within the marrow cavities of trabecular bone, produced by radiation from sources located on the surface and within the volume of trabeculae, for electrons of various energies. The phantom is constructed based on histomorphometric data from the literature. Monte Carlo simulations of dose formation were performed using the MCNP4C2 code for electron energies ranging from 30 keV to 500 keV. Dependencies of absorbed doses on emitted electron energies were found for layers of the marrow cavities between trabeculae with different thicknesses, associated with OB and various concentrations of HSC. It was shown that dividing the marrow cavities between trabeculae into thin micrometer-resolution layers is necessary for dosimetry in HSC for electrons with energies up to 200 keV emitted from the bone volume, and for energies up to 500 keV emitted from the bone surface. Further studies will investigate the influence of trabecular shape and extend the range of emitted electron energies up to 1500 keV.

Keywords: radiopharmaceuticals, beta-emitting radionuclides, dosimetric model, trabecular bone.

Введение. Один из способов терапии рака – применение радиофармацевтических препаратов (РФП), локально облучающих опухоль. Однако радионуклиды, включённые в состав РФП, облучают ткани неспецифически, поэтому могут облучать также здоровые ткани, что является побочным эффектом применения РФП [1].

В настоящее время разрабатываются РФП на основе таких β -излучающих радионуклидов, как ^{32}P , ^{89}Sr , ^{153}Sm , ^{177}Lu , ^{169}Er , ^{90}Y , ^{166}Ho , ^{161}Tb и др. [2, 3]. При накоплении таких РФП в трабекулярных костях облучению будут подвержены, в том числе, следующие нецелевые здоровые радиочувствительные клетки: гемопоэтические стволовые клетки (ГСК) и остеогенные клетки (остеобласты, ОБ) – что может привести к соответствующим онкологиям [4, 5]. Отсюда следует, что на этапе планирования РФП актуальной задачей является оценка их лучевого воздействия на ГСК и ОБ.

Оценка лучевого воздействия от β -излучателей, входящих в состав РФП, и инкорпорированных в объеме или на поверхности трабекулярной кости, на ГСК и ОБ может быть проведена с использованием цифровой дозиметрической модели, разрешение которой зависит от размеров тканей-источников и клеток-мишеней. Поскольку размер ОБ порядка 1 мкм, то необходимо микрометровое разрешение, которое при увеличении деталей в модели требует увеличения вычислительных ресурсов. Поэтому необходима оптимизация фантомов, снижающая детализацию без потери точности.

Таким образом, **цель работы:** определение необходимой степени детализации цифровой дозиметрической модели трабекулярной кости, предназначенной для оценки лучевого воздействия РФП на здоровые ГСК и ОБ трабекулярной кости.

Для достижения поставленной цели были выделены следующие задачи: оценка необходимости учёта неравномерного распределения ГСК в красном костном мозге (ККМ); оценка необходимости включения в модель остеоида; оценка необходимости включения в модель суррогатного источника (СИ), который является элементом, позволяющим учитывать облучение из кости, окружающей моделируемый фрагмент, что подробно описано ниже.

Материалы и методы. Проведённый в ходе работы анализ литературы [6] позволил найти данные об относительном расположении и геометрических характеристиках тканей-источников и клеток-мишеней, на основе которых были сформулированы приближения, использованные для построения модели.

В настоящей работе проводилось моделирование только стержневой трабекулярной кости, которая была построена в виде

кубической решётки с расположенными на рёбрах стержневыми трабекулами, представленными в виде цилиндров, в направлении от поверхности которых послойно размещались клетки-мишени: слой ОБ, толщиной 1 мкм; 4 слоя по 25% от всех ГСК ККМ, толщинами 35 мкм, 41 мкм, 43 мкм, и оставшаяся область. Моделируемые ткани-источники: объём трабекулы и остеоид – слой быстро абсорбирующего радионуклиды неминерализованного костного матрикса, толщиной 5 мкм, расположенный между поверхностью трабекулы и ОБ. Помимо указанных выше при моделировании применялись и другие усреднённые параметры: межтрабекулярное пространство – 322 мкм; диаметр трабекулы – 120 мкм. Из публикации МКРЗ 110 [7] взяты химический состав и плотности моделируемых сред.

Для упрощения и ускорения расчётов имитационного моделирования дозообразования модель была построена в два уровня: первый уровень – подробно моделируемый фрагмент трабекулярной кости, в котором построена микроархитектура кости и расположены все ткани-источники и клетки-мишени, как описано выше; второй уровень – окружающая подробно моделируемый фрагмент (первый уровень) однородная среда, обладающая средней плотностью спонгиозы (совокупности трабекул и костного мозга) и размерами грудного позвонка (длина – 4,998 см; ширина – 4,998 см; высота – 2,492 см). Второй уровень необходим для учёта перекрёстного облучения клеток-мишеней от радионуклидов, находящихся в окружающей подробно моделируемый фрагмент спонгиозе: облучение от второго уровня накапливалось на поверхности куба, в который помещён первый уровень, и грани которого отстоят от поверхности первого уровня на 0,025 см. После накопления энергии облучения от второго уровня этот куб сам становился источником излучения, названным суррогатным источником (СИ). СИ, в свою очередь, облучал клетки-мишени первого уровня.

Имитационное моделирование дозообразования от двух пар источников (объём кости и СИ; остеоид и СИ) в клетках-мишенях модели проводилось с использованием кода MCNP4C2 для электронов 11 энергий: 30 кэВ, 50 кэВ, 70 кэВ, 90 кэВ, 110 кэВ, 140 кэВ, 170 кэВ, 200 кэВ, 300 кэВ, 400 кэВ, 500 кэВ.

На основании результатов имитационного моделирования дозообразования в различных слоях ККМ и в ОБ рассчитывались следующие характеристики:

- 1) суммарная средневзвешенная поглощённая энергия (Ур.1);
- 2) доля поглощённой энергии в разных мишенях (Ур.2);
- 3) поглощённая доза (Ур.3);
- 4) вклад энергии, поглощённой клетками-мишенями от СИ, в суммарную средневзвешенную поглощённую энергию (Ур.4).

Характеристики рассчитывались по следующим формулам:

$$E_{\text{ср}} = E * \frac{V}{V+V_{\text{си}}} + E_{\text{си}} * \frac{V_{\text{си}}}{V+V_{\text{си}}}, (1)$$

$$Af = \frac{E_{\text{ср}}}{E_{\text{э}}}, (2)$$

$$S_v = \frac{E_{\text{ср}} * k}{m_{\text{миш}}}, (3)$$

$$F = \frac{E_{\text{си}}}{E_{\text{ср}}}, (4)$$

где $E_{\text{ср}}$ – суммарная средневзвешенная поглощённая энергия, МэВ;

E – поглощённая энергия от источника (объёма кости или остеоида), МэВ;

$E_{\text{си}}$ – поглощённая энергия от СИ, МэВ;

V – объём источника (объёма кости или остеоида), см³;

$V_{\text{си}}$ – объём спонгиозы, облучающей СИ, см³;

Af – доля поглощённой энергии;

$E_{\text{э}}$ – энергия эмиссии электрона, МэВ;

S_v – поглощённая доза, Гр/электрон;

$m_{\text{миш}}$ – масса мишени, кг;

k – коэффициент перехода из МэВ в Дж;

F – вклад энергии, поглощённой клетками-мишенями от СИ, в суммарную средневзвешенную поглощённую энергию.

Также было найдено отношение рассчитанных дозовых характеристик.

При этом критериями выбора степени детализации были:

- если для конкретного значения энергии излучаемых электронов показатель вариабельности значений,

соответствующих различным слоям ГСК ККМ, суммарной средневзвешенной поглощённой энергии, или доли поглощённой энергии, или поглощённой дозы выше 15%, то необходим учёт неравномерного распределения ГСК в ККМ;

- если отношения рассчитанных характеристик (Ур.1-4) не равны 1, то излучение из разных источников (объёма кости и СИ; остеоида и СИ) различно, что указывает на необходимость включения в модель меньшей ткани-мишени – остеоида;

- если вклад энергии, поглощённой клетками-мишенями от СИ, в суммарную средневзвешенную поглощённую энергию больше 15%, то необходимо включение в модель СИ;

- если конкретный критерий не выполняется, то соответствующим элементом модели можно пренебречь.

Результаты и обсуждение. Согласно приведённым выше критериям выбора степени детализации результаты имитационного моделирования дозообразования и последующих расчётов следующие:

- суммарная средневзвешенная поглощённая энергия и доля поглощённой энергии различны для различных слоёв ГСК и слоя ОБ; поглощённая доза в разных слоях ГСК ККМ обладает вариабельностью выше 15% для энергий электронов до 200 кэВ (при облучении из объёма кости и СИ), и до 500 кэВ (при облучении из остеоида и СИ), что указывает на необходимость учёта неравномерного распределения ГСК в ККМ для названных диапазонов энергий;

- отношения рассчитанных характеристик для всех рассматриваемых энергий (11 вышеуказанных энергий с 30 кэВ по 500 кэВ) не равны 1, что указывает на необходимость включения в модель остеоида для названного диапазона энергий;

- вклад энергии, поглощённой клетками-мишенями от СИ, в суммарную средневзвешенную поглощённую энергию выше 15% для энергий электронов 300 кэВ и выше (при облучении из объёма кости и СИ) и 200 кэВ и выше (при облучении из остеоида и СИ), что указывает на необходимость включения в модель СИ для названного диапазона энергий.

Выводы. Таким образом, в результате проведённой работы установлено, что:

- неравномерное распределение ГСК в ККМ необходимо учитывать для энергий электронов до 200 кэВ (при облучении из объёма кости и СИ), и до 500 кэВ (при облучении из остеоида и СИ), поскольку поглощённая доза в разных слоях ГСК ККМ для названного диапазона энергий обладает вариабельностью выше 15%;

- остеоид необходимо включить в модель для всех рассматриваемых энергий (11 вышеуказанных энергий с 30 кэВ по 500 кэВ), поскольку отношения рассчитанных характеристик для названного диапазона энергий не равны 1;

- СИ необходимо включить в модель для энергий электронов 300 кэВ и выше (при облучении из объёма кости и СИ) и 200 кэВ и выше (при облучении из остеоида и СИ), поскольку вклад энергии, поглощённой клетками-мишенями от СИ, в суммарную средневзвешенную поглощённую энергию выше 15% для названных диапазонов энергий.

Планируется расширить диапазон энергий электронов до 1500 кэВ, а также изучить влияние формы трабекул, проведя аналогичную работу для пластинчатой трабекулярной кости.

В дальнейшем определённая в работе необходимая степень детализации модели будет использована при оценке лучевого воздействия от РФП, содержащих β -излучающие радионуклиды, на здоровые ГСК и ОБ трабекулярной кости.

Благодарности. Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда по мероприятию «Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами» (региональный конкурс) (СОГЛАШЕНИЕ № 25-25-20092), поддерживаемого Регионом – программа Челябинской области «Развитие науки в Челябинской области», грант в форме субсидии (Соглашение № 30-2025-003346).

Список литературы:

1. Varghese, T. P. Revolutionizing cancer treatment: The role of radiopharmaceuticals in modern cancer therapy / T. P. Varghese, A. John, J. Mathew // Precision Radiation Oncology. – 2024. – Vol. 8, No. 3. – P. 145-152. – DOI 10.1002/pro6.1239.

2. Salih, S. Radiopharmaceutical Treatments for Cancer Therapy, Radionuclides Characteristics, Applications, and Challenges / S. Salih, A.

Alkatheeri, W. Alomaim, A. Elliyanti // *Molecules*. – 2022. – Vol. 27, No. 16. – Art. 5231. – DOI 10.3390/molecules27165231.

3. Zhang, S. Radiopharmaceuticals and their applications in medicine / S. Zhang, X. Wang, X. Gao [et al.] // *Signal Transduction and Targeted Therapy*. – 2025. – Vol. 10, No. 1. – Art. 1. – DOI 10.1038/s41392-024-02041-6.

4. Alamer, O. B. Primary and radiation induced skull base osteosarcoma: a systematic review of clinical features and treatment outcomes / O. B. Alamer, A. S. Haider, M. Haider [et al.] // *Journal of Neuro-Oncology*. – 2021. – Vol. 153, No. 2. – P. 183-202. – DOI 10.1007/s11060-021-03757-z.

5. Ando, K. [Radiation-induced hematopoietic disorders] / K. Ando, Y. Miyazaki // *The Japanese Journal of Clinical Hematology*. – 2022. – Vol. 63, No. 9. – P. 981-990. – DOI 10.11406/rinketsu.63.981.

6. Шарагин, П.А. Определение морфометрических характеристик костного мозга и кости с целью создания дозиметрической модели высокого разрешения / П.А. Шарагин, Р.М. Ахмадуллин, Е. И. Толстых, Е. А. Шишкина // *Радиационная гигиена*. – 2026. – Т. 19, № 2. – С. 75-83. – DOI 10.21514/1998-426X-2026-19-2-75-83.

7. ICRP, 2009. Adult Reference Computational Phantoms : ICRP Publication 110 // *Annals of the ICRP*. – 2009. – Vol. 39, No. 2. – 164 p.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МРТ С КОНТРАСТИРОВАНИЕМ ГАДОЛИНИЕМ И СЦИНТИГРАФИИ МИОКАРДА В ВЫЯВЛЕНИИ ПОСТКОВИДНОГО МИОКАРДИТА

*И.А. Дуванов, М.А. Афанасьева, Е.А. Овчинникова
ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России
(Пироговский университет), г. Москва
duvanov_ia@inbox.ru*

Актуальность. Поражение сердечно-сосудистой системы - одно из наиболее прогностически неблагоприятных проявлений новой коронавирусной инфекции (COVID-19): признаки вовлечения миокарда обнаруживаются у существенной части пациентов даже после клинического выздоровления, в том числе при нетяжёлом течении заболевания [1, 2]. Накоплены данные о подостром и хроническом течении постковидного миоэндокардиального повреждения с участием аутоиммунных механизмов. Диагностика затруднена низкой специфичностью клинической картины и биомаркёров миокардиального повреждения: повышение тропонина и натрийуретических пептидов отражает факт повреждения миокарда, но не позволяет верифицировать его воспалительную природу [3, 4]. Эндомиокардиальная биопсия как референсный метод ограничена инвазивностью и доступностью, что повышает роль неинвазивной визуализации. В отличие от МРТ с контрастированием, которая по критериям Lake Louise (2018) характеризует тканевые изменения миокарда (отёк, гиперемия, фиброз), сцинтиграфия оценивает перфузионно-метаболические нарушения, предоставляя дополнительную информацию. При этом сравнительная диагностическая ценность этих методов при постковидном миокардите и их связь с аутоиммунными серологическими маркерами исследованы недостаточно.

Цель исследования - оценить диагностическую эффективность МРТ с гадолиниевым контрастированием гадолинием и сцинтиграфии миокарда при постковидном поражении сердца, а также проанализировать взаимосвязь

выявленных изменений с клинико-лабораторными показателями и титром антикардиальных аутоантител.

Материал и методы. Проанализированы данные 51 пациента (28 женщин, 55 %, и 23 мужчин, 45 %; возраст 21–73 года, средний $40,6 \pm 11,9$ года) с постковидным синдромом, у которых имелись клинические или лабораторные признаки миокардиального повреждения. Контроль — 32 человека (18 мужчин, 56 %, и 14 женщин, 44 %; средний возраст $35,9 \pm 9,2$ года) без перенесённой коронавирусной инфекции и без патологии миокарда. Критерии включения: возраст ≥ 18 лет, подтверждённый ПЦР-тестом COVID-19 в анамнезе, подписанное информированное согласие. Критерии исключения: острый коронарный синдром, ранее верифицированный миокардит/кардиомиопатия неинфекционного генеза, гемодинамически значимые пороки, противопоказания к МРТ и контрастированию ($СКФ < 30$ мл/мин/ $1,73 \text{ м}^2$), беременность. Тяжесть COVID-19 классифицирована как лёгкая (1), среднетяжёлая (2), тяжёлая (3) согласно Временным методическим рекомендациям МЗ РФ. Оценивали кардиальные жалобы, АД, температуру тела. Лабораторные показатели определяли дважды — в 1-й и на 7–10-й день: высокочувствительный тропонин, КФК, КФК-МВ, NT-proBNP, D-димер, фибриноген, СРБ, ферритин, сывороточное железо, липидный и электролитный профили. Определяли титр антикардиальных антител; диагностически значимым считали титр $> 1:80$. МРТ выполняли на томографе Philips Ingenia 1,5 Тл с внутривенным контрастированием гадолинием: кино-МРТ, T2-ВИ/T2-картирование (отёк), нативное и постконтрастное T1-картирование с расчётом ECV, отсроченное контрастирование (LGE). Положительным считали сочетание не менее одного T2- и одного T1-критерия (Lake Louise, 2018). ЭКГ-синхронизированную сцинтиграфию проводили на аппарате Discovery NM/CT 670 (GE) с $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -технетрилом; зоны патологического накопления радиофармпрепарата расценивали как признак воспалительного повреждения. Анализировали ЭКГ в 12 отведениях и холтеровское мониторирование (ЖЭС, НЖЭС, ФП, СА- и АВ-блокады, блокады ножек пучка Гиса, удлинение QT), эхокардиографически — КДР, КСР, ФВ ЛЖ, СДЛА. Статистическую обработку проводили в Python 3.12. Распределение количественных данных по критерию Шапиро - Уилка отличалось от нормального, применяли непараметрические

методы; результаты представлены как Me [Q1; Q3]. Использовали U-критерий Манна — Уитни, критерий Краскела — Уоллиса, W-критерий Уилкоксона, χ^2 Пирсона или точный критерий Фишера. Корреляции оценивали коэффициентом Спирмена (Rs) и коэффициентом Мэтьюса (Rm) с интерпретацией по шкале Чеддока. Различия считали значимыми при $p \leq 0,05$.

Результаты. Признаки воспаления миокарда по критериям Lake Louise выявлены у 28 пациентов (MPT+), отсутствовали у 23 (MPT-); по данным сцинтиграфии - у 14 (сцинтиграфия+) и 37 (сцинтиграфия-) соответственно, то есть 55 % против 27 %. Группы MPT+ и MPT- были сопоставимы по тяжести перенесённого COVID-19 ($p = 0,610$) и частоте кардиальных жалоб: кардиалгии - 54 % против 43 % ($p_{1-2} = 0,473$), одышка - 57 % против 70 % ($p_{1-2} = 0,361$), перебои в работе сердца — 64 % против 70 % ($p_{1-2} = 0,691$); от контроля обе группы отличались по всем симптомам ($p < 0,001$).

Уровни биомаркёров повреждения и миокардиального стресса были значимо повышены относительно контроля ($p < 0,001$), однако не различались между MPT+ и MPT- (все $p > 0,3$). К 7–10-му дню отмечен выраженный рост NT-proBNP в обеих группах. При сравнении по результатам сцинтиграфии единственным различающим показателем оказалась КФК-МВ в 1-й день, причём выше — в группе сцинтиграфия- (11,4 [8,6; 19,6] против 6,87 [6,09; 7,7] Ед/л; $p_{1-2} = 0,016$); СРБ на 7–10-й день также был выше в этой подгруппе (7,4 [3,8; 11,65] против 3,6 [2,32; 6,28] мг/л; $p_{1-2} = 0,025$). Уровень ферритина к 7–10-му дню у пациентов был ниже, чем в контроле (MPT+: 76,3 [51,0; 143,3] против 99,5 [85,9; 135,0]; $p_{1-3} = 0,039$).

Желудочковая экстрасистолия регистрировалась у пациентов достоверно чаще, чем в контроле ($p < 0,01$), однако не была связана со статусом визуализации ни по MPT, ни по сцинтиграфии.

Выводы. Признаки воспалительного поражения миокарда у пациентов с постковидным синдромом выявляются при MPT сердца с гадолинием в 55 % случаев, при сцинтиграфии миокарда — в 27 %; различие долей отражает разную природу методов: критерии Lake Louise регистрируют отёк, гиперемию и фиброз, тогда как сцинтиграфия — перфузионно-метаболическую активность очага. Значительное повышение тропонина, КФК-МВ и NT-proBNP свидетельствует о высокой чувствительности, но низкой специфичности этих биомаркеров [3, 4], что делает визуализацию

обязательной для подтверждения диагноза. Выявленная корреляция МРТ и сцинтиграфии с высоким титром антикардиальных антител ($R_m = 0,33-0,35$; $p < 0,01$) подтверждает иммуноопосредованную природу поражения, характерную и для классического миокардита [5, 6]. МРТ превосходит сцинтиграфию по числу клинико-лабораторных связей (кардиалгии, гипотензия, NT-proBNP, ЛПНП, D-димер), что позиционирует её как ведущий диагностический инструмент; сцинтиграфия сохраняет роль дополнительного метода для оценки активности воспаления. Практически значимым является то, что сочетание жалоб на сердцебиение, перебои, одышку и гипотензию с повышением NT-proBNP и D-димера диктует необходимость определения антикардиальных антител и проведения МРТ с гадолинием вне зависимости от уровня тропонина.

Список литературы:

1. Puntmann V. O., Carerj M. L., Wieters I. et al. Outcomes of cardiovascular magnetic resonance imaging in patients recently recovered from coronavirus disease 2019 (COVID-19) // JAMA Cardiology. — 2020. — Vol. 5, № 11. — P. 1265–1273.
2. Kotecha T., Knight D. S., Razvi Y. et al. Patterns of myocardial injury in recovered troponin-positive COVID-19 patients assessed by cardiovascular magnetic resonance // European Heart Journal. — 2021. — Vol. 42, № 19. — P. 1866–1878.
3. Guo T., Fan Y., Chen M. et al. Cardiovascular implications of fatal outcomes of patients with coronavirus disease 2019 (COVID-19) // JAMA Cardiology. — 2020. — Vol. 5, № 7. — P. 811–818.
4. Siripanthong B., Nazarian S., Muser D. et al. Recognizing COVID-19-related myocarditis: the possible pathophysiology and proposed guideline for diagnosis and management // Heart Rhythm. — 2020. — Vol. 17, № 9. — P. 1463–1471.
5. Благова О. В., Коган Е. А., Лутохина Ю. А. и др. Постковидный миоэндокардит подострого и хронического течения: клинические формы, роль персистенции коронавируса и аутоиммунных механизмов // Кардиология. — 2021. — Т. 61, № 6. — С. 11–27.
6. Ammirati E., Frigerio M., Adler E. D. et al. Management of acute myocarditis and chronic inflammatory cardiomyopathy: an expert consensus document // Circulation: Heart Failure. — 2020. — Vol. 13, № 11. — P. e007405.

НАРУШЕНИЯ РИТМА И ПРОВОДИМОСТИ У ПАЦИЕНТОВ С ПОСТКОВИДНЫМ МИОКАРДИТОМ: СВЯЗЬ С ДАННЫМИ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И АНТИКАРДИАЛЬНЫМИ АНТИТЕЛАМИ

*Е.А. Овчинникова, И.А. Дуванов, М.А. Афанасьева
ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России
(Пироговский университет), г. Москва
ekaterina.kolcova96@yandex.ru*

Актуальность. Поражение миокарда в постковидном периоде остаётся актуальной проблемой: кардиальные жалобы сохраняются у 20–50 % реконвалесцентов, не всегда объясняясь структурной патологией [1, 2]. Субстратом нередко служит иммуноопосредованное миокардиальное повреждение [2, 3], верифицируемое МРТ с гадолинием, тогда как сцинтиграфия рассматривается как дополнительный метод оценки активности воспаления. Сравнительная ценность обоих методов при постковидном синдроме, их связь с аритмиями и антикардиальными антителами изучены недостаточно, что определяет актуальность работы.

Цель. Оценить частоту нарушений ритма и проводимости до и во время постковидного миокардита в зависимости от результатов МРТ сердца с гадолинием и сцинтиграфии миокарда, а также проанализировать связи данных визуализации с высоким титром антикардиальных антител и клинико-лабораторными показателями.

Материал и методы. В исследование включён 51 пациент с постковидным синдромом и подтверждённым миокардиальным повреждением (28 женщин, 55 %; 23 мужчины, 45 %) в возрасте 21–73 лет (средний $40,6 \pm 11,9$ года). Контроль — 32 человека (18 мужчин, 56 %; 14 женщин, 44 %; средний возраст $35,9 \pm 9,2$ года) без перенесённого COVID-19 и клинических признаков поражения миокарда.

Выполнены: клинический осмотр с оценкой кардиальных жалоб (кардиалгии, одышка, сердцебиение, артериальная гипотензия), ЭКГ в 12 отведениях, холтеровское мониторирование ЭКГ, эхокардиография (КДР, КСР, ФВ ЛЖ, СДЛА), лабораторное обследование (тропонин, КФК, КФК-MB, NT-proBNP, D-димер, липидный спектр), определение титра антикардиальных антител (антинуклеарный фактор, антитела к антигенам эндотелия, кардиомиоцитов, гладкой мускулатуры и волокон проводящей системы); высоким считался титр $>1:80$. Визуализация: МРТ сердца с

гадолинием по критериям Lake Louise 2018 (отёк, LGE неишемического характера), ЭКГ-синхронизированная сцинтиграфия с внутривенным введением ^{99m}Tc -технетрила. Перфузионно-метаболическую оценку миокарда проводили по стандартному протоколу с регистрацией зон патологического накопления радиофармпрепарата, расцениваемых как признаки воспалительного повреждения. Сформированы подгруппы МРТ позитивные (МРТ+) ($n = 28$), МРТ негативные (МРТ–) ($n = 23$) и сцинтиграфия позитивные (сцинтиграфия+) ($n = 14$), сцинтиграфия-негативные (сцинтиграфия–) ($n = 37$).

Результаты. Признаки воспаления миокарда выявлены у 28 из 51 пациента (55 %) по данным МРТ и у 14 из 51 (27 %) — по данным сцинтиграфии. Группы МРТ+ и МРТ– были сопоставимы по тяжести перенесённого COVID-19 и частоте кардиальных жалоб. Биомаркёры повреждения (тропонин, КФК-МВ, NT-proBNP) были повышены по сравнению с контролем, но между группами с воспалением и без него достоверно не различались, что подтверждает ограничение биомаркёров в диагностике подострого миокардита низкой активности.

Желудочковая экстрасистолия (ЖЭС) ещё до выявленного миокардиального повреждения достоверно чаще регистрировалась у пациентов, исследуемой группы, чем в контроле: в группе МРТ+ — 25 % против 0 % ($p = 0,003$), в группе сцинтиграфия– — 22 % против 0 % ($p = 0,005$). В период манифестации миокардиального повреждения частота ЖЭС возрастала до 54–61 % без межгрупповых различий (все $p > 0,4$). Фибрилляция предсердий (ФП), синоатриальные и атриовентрикулярные блокады, синдром удлинённого QT и депрессия ST встречались с сопоставимой частотой и не были связаны со статусом визуализации.

Высокий титр антикардиальных антител ($>1:80$) достоверно коррелировал с воспалительными изменениями на МРТ и при сцинтиграфии (табл. 3). С данными МРТ дополнительно ассоциировались кардиалгии ($R_m = 0,364$; $p = 0,001$), артериальная гипотензия ($R_m = 0,368$; $p = 0,001$), сердцебиение ($R_m = 0,338$; $p = 0,002$), одышка ($R_m = 0,273$; $p = 0,014$), повышение NT-proBNP в 1-е ($R_m = 0,343$; $p = 0,002$) и на 7–10-е сутки ($R_m = 0,305$; $p = 0,006$), ЛПНП ($R_m = 0,308$; $p = 0,005$ и $R_m = 0,293$; $p = 0,008$), D-димера ($R_m = 0,281$; $p = 0,011$) и КФК ($R_m = 0,251$; $p = 0,024$). Для сцинтиграфии значимой оказалась лишь связь с сердцебиением ($R_m = 0,315$; $p = 0,004$). Значимых корреляций данных визуализации с конкретными аритмиями не получено (табл. 1)

Табл. 1. Корреляция высокого титра антикардиальных антител (>1:80) с воспалительными изменениями по данным визуализации и выявленными аритмиями

Инструментальные данные	Rm [95 % CI]	p
МРТ с гадолинием	0.349 [0.201; 0.509]	0.001
Сцинтиграфия миокарда	0.349 [0.232; 0.481]	0.002
Фибрилляция предсердий	0.133 [0.07; 0.2]	1.000
ЖЭС	0.173 [-0.081; 0.405]	0.383
НадЖЭС	-0.165 [-0.429; 0.095]	0.343

Обсуждение. Более высокая частота выявления воспаления при МРТ (55 % против 27 %) закономерна: критерии Lake Louise регистрируют не только активную клеточную инфильтрацию, но и интерстициальный отёк и фиброзно-некротическую «память» повреждения, тогда как сцинтиграфия отражает преимущественно текущую метаболическую и фагоцитарную активность очага. Этим объясняется и более широкий спектр клинико-лабораторных ассоциаций МРТ. Выявление ЖЭС до документированного повреждения у четверти пациентов при полном её отсутствии в контроле указывает, что аритмический фенотип может опережать клиническую и визуализационную манифестацию воспаления и служить маркёром субклинического поражения миокарда. Патогенетически это объяснимо ранним электрическим ремоделированием: провоспалительные цитокины (ИЛ-6, ФНО- α) модулируют экспрессию и кинетику ионных каналов ($I_{Ca,L}$, I_{to} , I_{Kr}), нарушают межклеточные щелевые контакты и кальциевый гомеостаз саркоплазматического ретикулума, формируя субстрат триггерной активности и re-entry задолго до появления визуализируемого фиброза [3, 5]. Отсутствие связи конкретных аритмий с визуализацией согласуется с представлением о том, что аритмогенез определяется скорее локализацией очага и характеристиками его «пограничной зоны», чем самим фактом повреждения; в действующих рекомендациях МРТ рассматривается как инструмент стратификации риска, а не предиктор вида аритмии. Ассоциация высокого титра антикардиальных антител с воспалением при обоих методах подтверждает вклад иммуноопосредованного механизма и обосновывает включение иммунологического исследования в диагностический алгоритм наряду с визуализацией [2, 5].

Выводы. Воспаление миокарда выявлено у 55 % по МРТ и у 27 % по сцинтиграфии; группы МРТ+ и МРТ– сопоставимы по тяжести COVID-19, жалобам и биомаркерам миокардиального повреждения, что ограничивает использование последних для отбора на визуализацию. ЖЭС достоверно чаще встречалась уже до миокардита (25 % против

0 %; $p=0,003$), в период манифестации достигала 54–61 % независимо от статуса визуализации; другие нарушения ритма с данными МРТ/сцинтиграфии не коррелировали, что позволяет рассматривать ЖЭС как ранний неспецифический маркёр. Титр антикардиальных антител $>1:80$ коррелировал с воспалением по МРТ ($R_m=0,354$; $p=0,001$) и сцинтиграфии ($R_m=0,330$; $p=0,003$), подтверждая аутоиммунный механизм. МРТ с гадолинием демонстрирует более широкий спектр клиничко-лабораторных ассоциаций и является методом выбора; сцинтиграфия сохраняет значение как дополнительный метод оценки активности процесса.

Список литературы:

1. Ammirati E., Frigerio M., Adler E. D. et al. Management of acute myocarditis and chronic inflammatory cardiomyopathy: an expert consensus document // *Circulation: Heart Failure*. — 2020. — Vol. 13, № 11. — P. e007405.
2. Благова О. В., Коган Е. А., Лутохина Ю. А. и др. Постковидный миокардит: клинические варианты, морфологическая верификация, течение и лечение // *Кардиология*. — 2021. — Т. 61, № 6. — С. 11–27.
3. Ярмолинский И. И., Гуськова О. Н. Поражение миокарда при новой коронавирусной инфекции: механизмы и клиническое значение // *Российский кардиологический журнал*. — 2022. — Т. 27, № 3. — С. 45–53.
4. Ferreira V. M., Schulz-Menger J., Holmvang G. et al. Cardiovascular magnetic resonance in nonischemic myocardial inflammation: expert recommendations // *Journal of the American College of Cardiology*. — 2018. — Vol. 72, № 24. — P. 3158–3176.
5. Zeppenfeld K., Tfelt-Hansen J., de Riva M. et al. 2022 ESC Guidelines for the management of patients with ventricular arrhythmias and the prevention of sudden cardiac death // *European Heart Journal*. — 2022. — Vol. 43, № 40. — P. 3997–4126.

ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ АНТИКАРДИАЛЬНЫХ АУТОАНТИТЕЛ У ПАЦИЕНТОВ С КОРОНАВИРУСНОЙ ИНФЕКЦИЕЙ

*И.А. Дуванов, М.А. Афанасьева, Е.А. Овчинникова
ФГАОУ ВО РНИМУ им. Н.И. Пирогова Минздрава России
(Пироговский университет), г. Москва
galaaf68@yandex.ru*

Актуальность. В патогенезе миокардита при COVID-19 задействованы как прямое цитопатическое действие вируса, так и кардиотропные аутоиммунные реакции [1, 3], включающие дисрегуляцию иммунного ответа, молекулярную мимикрию и поликлональную активацию В-лимфоцитов с образованием аутоантител против структур сердца. Антикардиальные аутоантитела (АКАт) способны не только нарушать функцию кардиомиоцитов и усиливать воспаление, но и являются ключевым фактором хронизации миокардиального повреждения [2, 4], особенно в структуре постковидного синдрома. Хотя первые данные об аутоиммунитете к сердечным аутоантигенам были получены в 1987 г. (Neu et al.), их прогностическая и диагностическая значимость у пациентов, перенесших COVID-19 различной степени тяжести, остается малоизученной [3]. Несмотря на то, что эндомиокардиальная биопсия является «золотым стандартом» диагностики миокардита, она инвазивна и рискованна, а общепринятые воспалительные маркеры (СРБ, СОЭ, лейкоциты) малочувствительны при подостром и хроническом течении. Это диктует необходимость поиска неинвазивных биомаркеров, в частности АКАт, для раннего выявления кардиальных осложнений [5].

Цель. Оценить связь высокого титра антикардиальных аутоантител (АКАт) с клиническими симптомами, инструментальными признаками поражения миокарда и лабораторными маркерами миокардиального повреждения, некроза, воспаления, коагуляции и липидного обмена у пациентов, перенёсших COVID-19.

Материалы и методы. В исследование включен 51 пациент (23 мужчины и 28 женщин, средний возраст $40,6 \pm 11,9$ лет), с

подтвержденной коронавирусной инфекцией методом полимеразной цепной реакции (ПЦР) и миокардиальным повреждением верифицированным инструментально базовыми исследованиями (ЭКГ, Эхо-КГ, холтеровское мониторирование ЭКГ, компьютерная томография органов грудной клетки) и специфическими методами диагностики (МРТ сердца с контрастным усилением гадолинием и сцинтиграфия миокарда с применением ^{99m}Tc -технетрила) в сроки от 14 до 365 дней после инфекции. Также методом иммуноферментного анализа всем пациентам определяли уровень антикардиальных аутоантител в крови. Положительным считался суммарный титр $\geq 1:80$. Всем больным проводились клинический и биохимический анализы крови с определением уровней тропонина I, КФК, КФК-МВ, NT-proBNP, С-реактивного белка (СРБ), креатинина, мочевины, мочевой кислоты, аспартатаминотрансферазы (АсТ), аланинаминотрансфераза (АлТ), общего белка, липидного профиля, ферритина, сывороточного железа, глюкозы, исследовались уровни Д-димера и фибриногена, электролитов крови (натрий, калий, магний, хлор).

Результаты. Доля пациентов с высоким титром составила 45 человек (88 %). Высокий титр АКАт не был связан ни с одним уровнем тяжести COVID-19 (табл. 1).

Табл. 1. Связь высокого титра АКАт с тяжестью COVID-19 и клиническими проявлениями

<i>Переменная</i>	<i>Rm [95% CI]</i>	<i>p</i>
<i>Степень тяжести КВИ_1</i>	0,119	p=0.415
<i>Степень тяжести КВИ_2</i>	0,052	p=0.725
<i>Степень тяжести КВИ_3</i>	-0,211	p=0.145
<i>Боли в области сердца</i>	0,371	0.001
<i>Одышка</i>	0,603	<0.001
<i>Учащенное сердцебиение</i>	0,652	<0.001
<i>Перебои в работе сердца</i>	0,652	<0.001
<i>Артериальная гипертензия</i>	0,182	0.103
<i>Артериальная гипотензия</i>	0,583	<0.001

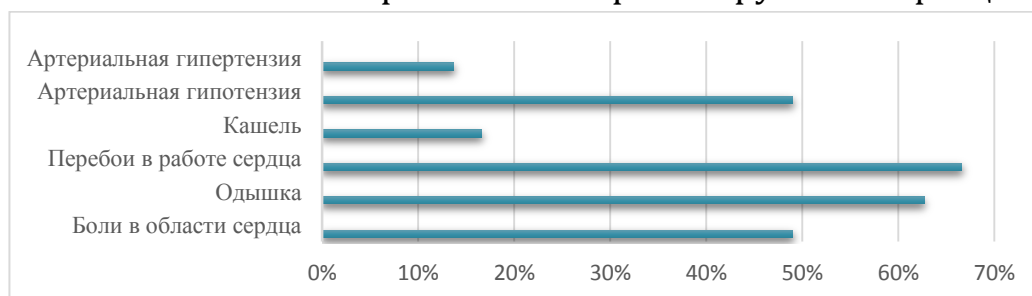
Значимыми предикторами миокардиального воспаления стали инструментальные данные: МРТ с гадолинием и сцинтиграфия сердца, с которыми умеренно коррелировал высокий титр антител (ОШ=5,1 и 15,0). Не было выявлено связи с параметрами ЭхоКГ, ЭКГ и ХМ-ЭКГ (табл. 2).

Табл. 2. Связь высокого титра АКАт с данными визуализации, ЭхоКГ, ЭКГ и ХМ-ЭКГ

Переменная	Rm [95% CI]	p
<i>МРТ с гадолинием</i>	0,354	0.001
<i>Сцинтиграфия миокарда</i>	0,330	0.003
<i>КДР_повышен</i>	0,197	0.079
<i>КСР_повышен</i>	0,082	0.469
<i>ФВ_снижена</i>	0,210	0.060
<i>СДЛА_повышена</i>	0,100	0.375
<i>Синдром удлинённого QT во время миокардита</i>	0,083	0.573
<i>Фибрилляция предсердий во время миокардита</i>	0,112	0.443
<i>СА-блокада во время миокардита</i>	-0,023	0.875
<i>ЖЭС во время миокардита</i>	0,156	0.284
<i>НаджЭС во время миокардита</i>	-0,117	0.424
<i>Блокада ЛНПГ во время миокардита</i>	-0,046	0.752
<i>Блокада ПНПГ во время миокардита</i>	-0,210	0.147
<i>АВ-блокада во время миокардита</i>	-0,001	0.994
<i>Наджелудочковая тахикардия во время миокардита</i>	-0,152	0.298
<i>Желудочковая тахикардия во время миокардита</i>	-0,022	0.881

Среди клинических проявлений наиболее сильными предикторами стали аритмические жалобы (ОШ=44,3; псевдо- $R^2=0,372$), артериальная гипотензия и одышка (ОШ=36,0; псевдо- $R^2=0,329$) (табл.1., рис.1.).

Рис. 1. Клинические проявления коронавирусной инфекции



Фоновые заболевания, такие как ХСН и СД 2 типа определяющей роли не играли (табл. 3). Гипертоническая болезнь показала умеренную связь в нескорректированной модели, утратившую значимость после поправки на пол и возраст.

Лабораторный профиль характеризовался воспроизводимым в динамике повышением NT-proBNP и D-димера, при отсутствии корреляции с фибриногеном (табл. 4). NT-proBNP нарастал при сохранной фракции выброса и стабильных КДР/КСР, что позволяет расценивать его как маркер диастолической дисфункции на фоне интерстициального отека (LGE-позитивность) и маркер активности аутоиммунного процесса. Персистирующее повышение D-димера подтверждает хроническую эндотелиопатию в рамках концепции иммунотромбоза. К 7–10-м суткам самостоятельную предикторную значимость приобрёл повышенный ЛПНП (ОШ=17,9; $p=0,007$), когда ТГ показали слабую отрицательную связь (табл. 4).

Табл. 4. Динамика ключевых количественных маркеров в исследуемой группе

Показатель	1-е сутки	7-10-е сутки
<i>NT-proBNP, пг/мл</i>	164,0 [61,88;231,5]	1065,0 [82,0;1107,65]
<i>D-димер, нг/мл</i>	178,0 [141,95;282,71]	264,0 [186,5;449,0]
<i>ЛПНП, ммоль/л</i>	3,32 [2,9;3,8]	3,06 [2,36;3,31]

Маркеры некроза (тропонин I, КФК-МВ) и системного цитолиза (КФК, АсТ, АлТ; $p>0,05$) ни на одном сроке с титрами АКАт не коррелировали. Таким образом, ключевой находкой является несоответствие между выраженностью клинической симптоматики и субнекротическими уровнями тропонина I и КФК-МВ.

Выводы. Полученные нами данные указывают, что высокий титр АКАт у пациентов, перенёсших COVID-19, представляет самостоятельный диагностический феномен, отражающий иммуноопосредованный характер миокардиального повреждения и не зависящий от тяжести острой фазы. Диссоциация симптомов и маркеров некроза указывает на субнекротический отёчно-воспалительный механизм с вовлечением эндотелия, интерстиция и проводящей системы. Клинико-лабораторный фенотип высокого титра в нашем исследовании характеризуется триадой: гипотензивно-аритмический симптомокомплекс; инструментальные признаки

воспаления на МРТ с гадолинием и сцинтиграфии; биохимический профиль с персистирующим повышением NT-proBNP, D-димера и ЛПНП к 7–10-м суткам. Определение АКАт позволяет дифференцировать аутоиммунный постковидный миокардит от иных форм миокардиального повреждения [2, 5], выделить группу риска желудочковых аритмий и вегетативной дисфункции и обосновать патогенетическую иммуномодулирующую терапию [4]. Ввиду независимости титра от тяжести инфекции целесообразно включение АКАт в алгоритм обследования пациентов с кардиальными жалобами, сохраняющимися более 4 недель.

Список литературы:

1. Dotan A., Muller S., Kanduc D. et al. The SARS-CoV-2 as an instrumental trigger of autoimmunity // *Autoimmunity Reviews*. – 2021. – Vol. 20, № 4. – P. 102792. – DOI: 10.1016/j.autrev.2021.102792.
2. Schnurr K., Bhatt D. L., Guzik T. J. Autoantibodies and cardiovascular complications of COVID-19 // *European Heart Journal*. – 2022. – Vol. 43, № 18. – P. 1694–1697. – DOI: 10.1093/eurheartj/ehac070.
3. Knight J. S., Caricchio R., Casanova J. L. et al. The intersection of COVID-19 and autoimmunity // *Journal of Clinical Investigation*. – 2021. – Vol. 131, № 24. – P. e154886. – DOI: 10.1172/JCI154886.
4. Благова О.В., Коган Е.А., Лутохина Ю.А., Куклева А.Д. и др. Постковидный миоэндокардит подострого и хронического течения: клинические формы, роль персистенции коронавируса и аутоиммунных механизмов // *Кардиология*. – 2021. – Т. 61, № 6. – 11–27. – DOI: 10.18087/cardio.2021.6.n1659
5. Лёвочкина Э. Д. Диагностическая и прогностическая роль мультикомплексных аутоиммунных биологических маркеров кардиальной патологии // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Медицина*. – 2023. – Т. 27, № 1. – 71–82. – DOI: 10.22363/2313-0245-2023-27-1-71-82.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ В ОФТАЛЬМОЛОГИИ

Н.В. Корсакова¹, В.А. Капцов², О.Ю. Алексеева¹

*1 ФГАОУ ВО «Российский национальный исследовательский
медицинский университет имени Н.И. Пирогова» Минздрава России;*

*2 ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт
гигиены транспорта» Роспотребнадзора; город Москва,*

Praskurnichey@mail.ru

Актуальность. Согласно данным Федеральной службы государственной статистики (Росстат, 2023), в структуре первичной инвалидности по зрению в Российской Федерации на долю возрастной макулярной дегенерации (ВМД) приходится около четверти всех случаев (23,9%). Высокая распространённость инвалидизирующей патологии сетчатки, диктует необходимость внедрения высокоточных методов инструментальной диагностики, ключевым инструментом которой являются современные лазерные офтальмологические приборы [1]. Однако их клиническое применение требует углубленного понимания фундаментальных механизмов взаимодействия лазерного излучения различных спектральных диапазонов с биологическими тканями, а также учёта существующих ограничений и противопоказаний.

Цель. Проанализировать фундаментальные аспекты применения лазерного излучения диагностических приборов в офтальмологии.

Материал и методы. Работа выполнена в формате аналитического обзора. Материалами послужили официальные статистические данные Росстата за 2023 год, оригинальные исследования и обзорные публикации, а также нормативно-техническая документация (ГОСТ IEC 60825-1:2013) и руководства по эксплуатации лазерных диагностических приборов.

Результаты. История клинической лазерной диагностики начинается с 1980 года, когда R. Webb с соавт. представили сканирующий лазерный офтальмоскоп (SLO), использующий отклоняемый луч для построения растрового изображения сетчатки. В 1987 году внедрение конфокальной фильтрации (cSLO) с апертурным отверстием позволило элиминировать внефокусное

рассеяние, повысив контрастность и разрешение изображений. Создание лазерного сканирующего томографа (LTS, 1989) и его коммерческой версии – Гейдельбергского ретинотомографа (HRT) – обеспечило трёхмерную реконструкцию диска зрительного нерва по серии аксиальных срезов с шагом 62,5 мкм. С 1997 года системы адаптивной оптики (АО) достигли латерального разрешения 2-3 мкм, обеспечив визуализацию фоторецепторов сетчатки и капиллярного кровотока. С 1996 года активно внедряется оптическая когерентная томография (ОКТ). Временная ОКТ (TD-OCT), использующая суперлюминесцентный диод и механически перемещаемое зеркало в опорном плече, позволила получать двумерные томограммы. Переход к спектральной ОКТ (SD-OCT) в 2006 году с регистрацией всей интерферограммы и применением быстрого преобразования Фурье повысил скорость сканирования до десятков тысяч А-сканов в секунду. С 2010 года доступна swept-source ОКТ (SS-OCT) с длиной волны 1050 нм, обеспечивающая глубокую визуализацию хориоидеи через умеренно помутнённые оптические среды. ОКТ-ангиография (ОСТ-А, 2014-2015 годы), основанная на анализе декорреляции сигнала между повторными В-сканами, позволяет визуализировать капиллярные сплетения сетчатки и хориокапилляры без введения контрастного вещества. Современные системы, основанные на измерении времени затухания флуоресценции эндогенных флуорофоров (FLIO), предоставляют информацию о метаболическом состоянии пигментного эпителия, позволяя выявлять ранние нарушения при ВМД [2, 3].

На основе изученных физико-химических и клеточных эффектов лазерного излучения различных длин волн, на текущий момент установлены различные биологические эффекты его воздействия на ткани организма, кратко изложенные далее [4-6].

Ультрафиолетовое излучение (100-400 нм) инициирует фотохимические реакции, приводящие к образованию ковалентных сшивок коллагена, активации перекисного окисления липидов (фотостарение) и мутациям ДНК (риск канцерогенеза).

Лазер синего спектра (375-495 нм) демонстрирует дозозависимый бифазный эффект: в низких (фотобиомодулирующих) дозах он стимулирует пролиферацию фибробластов, синтез коллагена, ангиогенез через VEGF, вазодилатацию за счёт NO и повышение синтеза АТФ. В высоких дозах, напротив, происходит

торможение пролиферации, снижение синтеза коллагена и VEGF, что обусловлено генерацией избыточных активных форм кислорода и активацией p53-зависимых путей.

Зелёный лазер (495-570 нм) подавляет клеточное деление вследствие снижения синтеза АТФ и модуляции внутриклеточного кальция, оказывает противовоспалительное действие через блокаду NF-κB-пути, стимулируя ангиогенез и дифференцировку клеток через активацию CREB.

Жёлтое излучение (570-590 нм), поглощаясь оксигемоглобином, вызывает обратимую облитерацию сосудов, противовоспалительный эффект (ингибирование NF-κB и ЦОГ-2), замедляет деградацию коллагена, снижает выработку меланина через ингибирование тирозиназы.

Красный (620-750 нм) и ближний инфракрасный (750-1400 нм) лазеры имеют сходные механизмы на клеточном уровне – воздействие на цитохром с оксидазу, ускорение электронного транспорта, диссоциацию NO и генерацию умеренных АФК, активирующих сигнальные пути MAPK, PI3K/Akt и Nrf2, вызывает выраженную вазодилатацию (за счёт усиленной продукции NO) и повышение устойчивости клеток к стрессу (индукция белков теплового шока). Средний инфракрасный лазер (1400-3000 нм) за счёт поглощения водой при высокоинтенсивном воздействии вызывает мгновенную абляцию ткани с вапоризацией и минимальной зоной коагуляционного некроза; при низкоинтенсивном режиме – денатурацию коллагена с последующим ремоделированием внеклеточного матрикса.

Учитывая известные на данный момент биологические эффекты лазерного излучения на ткани организма, установлены клинические ограничения и меры безопасной эксплуатации лазерного оборудования. Согласно ГОСТ IEC 60825-1:2013, лазерные приборы классифицируются по семи классам опасности. Большинство серийных офтальмологических диагностических систем относятся к 1 классу

(не допускающему доступа к излучению, превышающему пределы безопасности). Однако клиническое применение ограничено рядом факторов: невозможность фиксации взгляда (нистагм, тремор), помутнение оптических сред (катаракта, гемофтальм), фотосенсибилизация, фотодерматиты, приём

фотосенсибилизирующих препаратов, недавно перенесённая фотодинамическая терапия, а также эпилепсия. Особую значимость приобретает риск индукции неоваскуляризации при воздействии на ткани с повышенной фотосенситивностью, что подтверждено широко известной экспериментальной моделью лазер-индуцированной хориоидальной неоваскуляризации для изучения влажной формы ВМД [7]. Таким образом, кумулятивный эффект многократных воздействий лазерного излучения на ткани организма требует строгого соблюдения дозовых режимов и учёта индивидуальных особенностей конкретного пациента.

Выводы.

1. В настоящее время наблюдается устойчивый рост эпидемиологической значимости патологий сетчатки, для ранней диагностики которой необходима высокоточная диагностика, в т.ч. с использованием лазерных технологий в диагностических приборах.

2. Лазерное излучение разных длин волн реализует через принципиально различные физико-химические эффекты разнообразные клеточные и тканевые биологические эффекты.

3. Понимание фундаментальных механизмов влияния лазерного излучения различных длин волн на ткани организма лежит в основе принципов практического мультимодального применения современных высокоточных лазерных приборов, в том числе в офтальмологии.

4. Учитывая изученные физиологические и патофизиологические биологические эффекты лазерного излучения на ткани организма, требует строгого соблюдения допустимых доз поглощенной тканями лазерной энергии, в том числе с учетом индивидуальных особенностей тканей конкретного пациента.

Список литературы:

1. Wong W.L. Global prevalence of Age-related macular degeneration and disease burden projection for 2020 and 2040: a systemic review and meta-analysis. Lancet, 2014, vol. 2, pp. e106-e116.

2. Fischer J., Otto T., Delori F., Pace L., Staurenghi G. Scanning Laser Ophthalmoscopy (SLO). High Resolution Imaging in Microscopy and Ophthalmology. Cham: Springer, 2019, pp. 35-57. DOI: 10.1007/978-3-030-16638-0_2

3. Семенова Н.С., Ларичев А.В., Акопян В.С. «Swept source» — оптическая когерентная томография: обзор технологии // Вестник

офтальмологии. 2020. Т. 136. № 1. С. 111–116. DOI: 10.17116/oftalma2020136011111.

4. Campbell C.J., Rittler M.C., Koester C.J. The optical maser as a retinal coagulator: an evaluation. Trans Am Acad Ophthalmol Otolaryngol, 1963, vol. 67, pp. 58-67.

5. Cadet J., Angelov D., Di Mascio P., Wagner J.R. Contribution of oxidation reactions to photo-induced damage to cellular DNA. Photochem Photobiol, 2024, vol. 100, pp. 1157-1185. doi:10.1111/php.13990

6. Opländer C., Suschek C.V. The role of photolabile dermal nitric oxide derivatives in ultraviolet radiation (UVR)-induced cell death. Int J Mol Sci., 2012, vol. 14, no. 1, pp. 191-204. doi: 10.3390/ijms14010191

7. Salas A., Badia A., Fontrodona L., Zapata M., García-Arumí J., Duarri A. Neovascular Progression and Retinal Dysfunction in the Laser-Induced Choroidal Neovascularization Mouse Model. Biomedicines, 2023, vol. 11, no. 9, pp. 2445. doi: 10.3390/biomedicines11092445

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ОБЕСПЕЧЕНИИ КАЧЕСТВА ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ: ПИЛОТНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

*Ж.Ж. Смирнова, Д.Ю. Бобров, А.В. Белоусов, Г.А. Крусанов,
М.А. Колыванова
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, г. Москва
smirnova_zhanneta@mail.ru*

Актуальность. Сложность методов лучевой терапии с модуляцией интенсивности пучка, таких как Intensity Modulated Radiotherapy (IMRT) и особенно Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT), связана с синхронизацией множества динамических параметров в процессе доставки дозы: скорости вращения гентри, интенсивности пучка и непрерывного перемещения лепестков многолепесткового коллиматора (МЛК). Для подтверждения технической реализуемости таких планов облучения применяется протокол пациент-ориентированного контроля качества - Patient Specific Quality Assurance или PSQA. Данная процедура представляет собой прямое измерение фактического распределения дозы (с использованием детекторных систем) с последующим сравнением

полученных данных с расчетным распределением, сформированным в системе планирования (СП). Для количественной оценки степени соответствия между измеренным и расчетным распределениями традиционно применяется метод гамма-анализа (Gamma Passing Rate, GPR), предложенный Low и соавторами в 1998 году [3]. Процедура PSQA является неотъемлемой частью всеобъемлющей программы обеспечения качества лучевой терапии, стандартизована и подробно описана в руководстве Американской Ассоциации медицинских физиков (AAPM TG-218) [4]. Вместе с тем, проведение PSQA сопряжено с существенными временными затратами, создаёт дополнительную нагрузку на медицинских физиков и снижает пропускную способность линейных ускорителей.

Широкое внедрение цифровых технологий в медицинскую сферу, развитие искусственного интеллекта (ИИ) и компьютерных систем позволяют использовать большие объемы накопленных данных для создания «проактивных» систем обеспечения качества лучевой терапии, в частности прогнозирования GPR планов IMRT и VMAT.

Эволюция подходов к прогнозированию результатов дозиметрической верификации прошла путь от анализа единичных метрик сложности плана до ансамблевых регрессионных моделей и глубокого обучения [5]. Разработка прогностических моделей на основе машинного обучения (МО) позволит уже на этапе расчёта доз выявлять планы с риском недостоверной верификации и рассматриваются как перспективное направление создания «виртуального PSQA».

Цель. Целью данной работы является разработка методики прогнозирования GPR для VMAT и IMRT планов лучевой терапии на основе МО, позволяющей обоснованно сократить объём рутинных физических измерений и сфокусировать ресурсы на критически сложных планах и, как следствие, повысить общую эффективность и безопасность лучевой терапии.

Материалы и методы. В данном исследовании прогнозирование GPR с помощью МО сводится к задаче обучения с учителем, так как материал исследования представляет собой ретроспективный массив данных с известной целевой переменной [2]. В качестве предикторов использовались базовые параметры, извлечённые из системы планирования (DICOM RT – геометрия и количество пучков, параметры мультилепесткового коллиматора

(МЛК), мониторные единицы (МЕ), количество дуг, тип ускорителя); МЛК метрики (общий путь лепестков, среднее перемещение, максимальное перемещение); метрики вращения гентри (полный угол вращения, максимальное изменение угла, среднее изменение угла, количество смен направлений движения), а также производные признаки (путь лепестков на одну МЕ, эффективность МЛК, описывающая равномерность движения лепестков, равномерность вращения, индекс сложности, фактор модуляции движения лепестков, нагрузка (одновременность больших смещений гентри и лепестков; плотность контрольных точек на МЕ). В качестве целевой переменной - значение GPR по критериям 2%/2 мм, 3%/2 мм и 3%/3 мм, удовлетворяющих условию $\geq 95\%$ точек. Верификация планов проведена на матрице полупроводниковых детекторов ArcCheck (Sun Nuclear).

На промежуточном этапе исследования в пилотную выборку включено 200 VMAT-планов для рака молочной железы (лево- и правосторонняя локализация) как с вовлечением регионарных лимфатических узлов, так и без. Планирование осуществлялось в системе Eclipse (Varian) версии 16.1. Количество дуг составляло 4 - для планов облучения только молочной железы и 5–6 при вовлечении лимфатических узлов.

Оценка качества моделей в работе проводилась по трем статистическим метрикам с использованием кросс-валидации [1]: MAE (Mean Absolute Error) - среднее абсолютное отклонение предсказанного GPR от измеренного, где меньшее значение соответствует лучшему результату, RMSE (Root Mean Square Error) - для минимизации риска значительных ошибок прогноза и коэффициенту детерминации R^2 как меры адекватности аппроксимации, где значение, близкое к 1, указывает на высокую объяснительную способность модели, значение, близкое к 0 — на её непригодность.

Для прогнозирования сравнивались несколько архитектур, в том числе линейная регрессия, гребневая регрессия, Random Forest, градиентный бустинг (XGBoost), метод опорных векторов с RBF-ядром (SVR) и метод k-ближайших соседей (KNN).

Результаты. На промежуточном этапе наилучшие результаты показала модель KNN (k=3) для критерия 2%/2 мм с MAE = 1,14%, а

также модель SVR с RBF-ядром при MAE = 0,44% и 0,46% для критериев 3%/2 мм и 3%/3 мм соответственно.

Выводы. Прогнозирование GPR с использованием методов машинного обучения является быстро развивающимся направлением в медицинской физике. Пилотные результаты на выборке из 200 VMAT-планов рака молочной железы подтверждают принципиальную возможность прогнозирования GPR, а ошибка прогноза (MAE = 0,44–1,14%) сопоставима с литературными данными. Ключевыми вызовами остаются интерпретируемость моделей, преодоление дисбаланса классов и обеспечение обобщаемости при переходе на другое оборудование. Дальнейшее исследование предполагает расширение выборки до ≥ 500 планов, разработку программного фреймворка для извлечения данных из DICOM RT Plan и валидацию разработанной методики на независимой клинической выборке.

Список литературы:

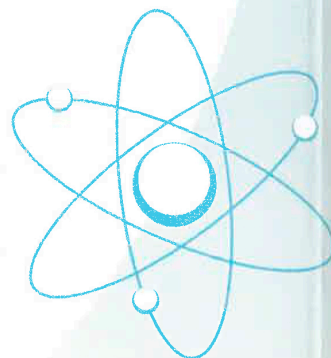
1. Chicco D., Warrens M.J., Jurman G. The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation // PeerJ Computer Science. 2021. Vol. 7. Article e623. DOI: 10.7717/peerj-cs.623.
2. Djoumessi Zamo F.C., Coliaux A., Blot-Lafond V., Moyo N., Njeh C.F. Enhancing patient-specific quality assurance for VMAT for breast cancer treatment: A machine learning approach for gamma passing rate (GPR) prediction // Journal of Applied Clinical Medical Physics. 2025. Vol. 26, No. 9. Article e70251. DOI: 10.1002/acm2.70251.
3. Low D.A., Harms W.B., Mutic S., Purdy J.A. A technique for the quantitative evaluation of dose distributions // Medical Physics. 1998. Vol. 25, No. 5. P. 656–661. DOI: 10.1118/1.598248.
4. Miften M., Olch A., Mihailidis D., Moran J., Pawlicki T., Molineu A., Li H., Wijesooriya K., Shi J., Xia P., Papanikolaou N., Low D.A. Tolerance limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: Recommendations of AAPM Task Group No. 218 // Medical Physics. 2018. Vol. 45, No. 4. P. e53–e83. DOI: 10.1002/mp.12810.
5. Smirnova Zh.Zh., Bobrov D.Yu., Zavialov A.A. Predicting Gamma Passing Rate for Patient Specific Quality Assurance Using Machine and Deep Learning: A Review of Methodological Approaches // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2026. Т. 71, № 2. С. 147–152.

Международный конгресс

«Ядерная медицина и радиационная безопасность»

посвящен актуальным вопросам развития ядерной медицины, радиационной безопасности, научных исследования и внедрения передовых технологий.

Сборник содержит материалы докладов, представленных ведущими российскими и зарубежными специалистами, отражающие современные достижения, практический опыт и перспективы дальнейшего развития отрасли.



ТЕМАТИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ КОНГРЕССА:



ЗДОРОВЬЕ

Ядерная физика, радиохимия и радиофармацевтика

Современные подходы к лечению онкологических заболеваний

Радиология в современной медицине

Развитие ядерной медицины

Радиофармацевтические препараты в онкологии



БЕЗОПАСНОСТЬ

Радиобиология и радиационная безопасность

Радиационная защита и применение радиопротекторов

Ядерная, радиационная и промышленная безопасность

Радиационная безопасность персонала



НАУКА

Инновационные технологии в здравоохранении

Фундаментальные исследования в ядерной медицине

Новые радиофармацевтические препараты и технологии

Современные методы диагностики и терапии

ОРГАНИЗАТОР
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ
им. А.И. Бурназяна
ФМБА России



123098, г. Москва,
ул. Маршала Новикова, д.23



+7 (499) 190-85-55



fmbc@fmbamail.ru



fmbafmbc.ru



fmbafmbc.ru

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:



ГАММАТЕХ

