

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПЕРСОНАЛА, РАБОТАЮЩЕГО С ^{131}I В УСЛОВИЯХ РАДИОНУКЛИДНОЙ ТЕРАПИИ И ДИАГНОСТИКИ: АНАЛИЗ РЕГУЛЯТОРНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ И СНИЖЕНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РИСКОВ

А. К. Дауменова¹, С. З. Танатаров¹, Б. Ж. Атантаева¹, М. Т. Идинов^{1,2},
Д. Н. Адильбаев¹, Б. Е. Дауменов^{1,2}, Р. Р. Ролланұлы¹, Д. Б. Кенжина^{3*}

¹КГП на ПХВ Центр ядерной медицины и онкологии области Абай, Семей, Казахстан

²Некоммерческое акционерное общество «Шәкәрім университет», г. Семей, Казахстан,

³Филиал Институт радиационной безопасности и экологии РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

* E-mail для контактов: laurakenzhina@yandex.kz

В работе исследованы особенности формирования индивидуальных дозовых нагрузок у персонала группы А ($n = 20$), работающего с радиоактивным йодом-131 (^{131}I) в условиях радионуклидной терапии и диагностики. Целью исследования являлась оценка информативности индивидуального дозиметрического контроля при анализе как внешнего, так и внутреннего облучения в реальной клинической практике Центра ядерной медицины и онкологии области Абай. На основе ретроспективного анализа данных индивидуального дозиметрического контроля и спектрометрии излучения человека изучена вариабельность активности ^{131}I в щитовидной железе персонала и ее вклад в формирование годовой эффективной дозы. Показано, что при соблюдении регламентов радиационной безопасности профессиональные дозовые нагрузки остаются значительно ниже установленных нормативных пределов. Вместе с тем выявлено, что различия показателей внутреннего облучения в большей степени связаны с индивидуальными клиничко-физиологическими особенностями функции щитовидной железы, чем с условиями профессиональной деятельности. Полученные результаты демонстрируют, что индивидуальный дозиметрический контроль может рассматриваться не только как регуляторный, но и как аналитический инструмент, позволяющий глубже интерпретировать механизмы формирования дозовых нагрузок и обосновывать направления дальнейшей оптимизации системы радиационной защиты в рамках принципа ALARA.

Ключевые слова: щитовидная железа, радиоактивный йод (^{131}I), радиойодтерапия, индивидуальный дозиметрический контроль, радиационная безопасность, доза облучения, радионуклидная диагностика, дозовые нагрузки персонала, ALARA.

ВВЕДЕНИЕ

Радионуклидная терапия, в частности лечение дифференцированного рака щитовидной железы с использованием радиоактивного йода-131 (^{131}I), является одним из ключевых направлений современной ядерной медицины [1,2]. Применение ^{131}I обусловлено его уникальными свойствами: он является одновременно источником β -частиц (с энергией 606 кэВ для терапевтического воздействия на опухолевые клетки) и γ -квантов (с энергией 364 кэВ для целей визуализации), что обеспечивает его высокую эффективность в онкологии [3].

Работа с высокими активностями ^{131}I , связанная с фасовкой, выдачей и последующим обращением с радиоактивными отходами, сопровождается повышенной вероятностью радиационного воздействия на персонал группы А [4,5]. Изотоп ^{131}I характеризуется периодом полураспада 8,02 суток и, что критически важно, характеризуется высокой летучестью при работе с растворами. Эти факторы создают потенциал как для внешнего (от контейнеров и пациентов), так и для внутреннего облучения, возникающего в ре-

зультате ингаляционного поступления паров и аэрозолей [6]. Все это делает критически значимым не только контроль внешней дозы, но и мониторинг внутреннего облучения, что подтверждается выводами ICRP 137, ICRP 130, IAEA SSG-46 и UNSCEAR 2024 Report [7-10].

С 2021 года, после запуска отделения радионуклидной терапии – первого центра в Республике Казахстан, где радиотерапию по показаниям прошли более 2500 пациентов со всей страны, на Центр ядерной медицины и онкологии (ЦЯМ и О) области Абай возложена особая ответственность по обеспечению максимальной радиационной безопасности. Основные пути формирования дозовой нагрузки персонала включают ингаляцию аэрозолей радиоактивного йода, контакт с контаминированными поверхностями, а также сопровождение пациентов сразу после выдачи терапевтических активностей, достигающих 3,7-7,4 ГБк [11]. Наиболее уязвимыми оказываются радиофармацевты, медсестры и вспомогательный персонал, участвующие в подготовке, транспортировке, помещении пациентов в изолированные палаты, а также

осуществляющие контроль за состоянием пациента в первые часы после терапии.

В связи с этим, в строгом соответствии с Законом Республики Казахстан «О радиационной безопасности населения» и санитарно-эпидемиологическими требованиями [12,13], служба радиационной безопасности Центра регулярно проводит комплексный мониторинг персонала. Несмотря на то, что международные нормативы детально регламентируют пределы доз и требования к организации работ с открытыми источниками, в ряде регионов, включая страны Центральной Азии, комплексные исследования фактических дозовых нагрузок персонала при работе с радиоактивным йодом ограничены. Это приводит к дефициту объективных данных для анализа рисков и затрудняет разработку целевых мер оптимизации радиационной безопасности.

Нормативно-правовое регулирование радиационной безопасности в ядерной медицине базируется на международных рекомендациях, прежде всего, на документах Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) [14] и Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) [15]. В публикации ICRP 103 [5] установлены базовые пределы доз, а в ICRP 130 и ICRP 137 [7,8] детализированы биокинетические модели поведения ^{131}I , оценки доз на щитовидную железу при ингаляционном поступлении и базовые принципы и пределы дозовых нагрузок для персонала группы А (например, 20 мЗв/год, усредненные за 5 лет). Руководства МАГАТЭ GSR часть 3 и IAEA SSG-46 [16] детально регламентируют требования к проектированию помещений, вентиляции, размещению вытяжных шкафов и обращению с открытыми источниками ^{131}I , а также подчеркивают важность надлежащей инженерной инфраструктуры.

Внутреннее облучение представляет собой отдельное и наиболее значимое воздействие, поскольку ^{131}I селективно накапливается в щитовидной железе (ЩЖ), которая является критическим органом для данного радионуклида [17]. С целью контроля и оценки внутреннего облучения персонал группы А регулярно проходит дозиметрию с использованием специализированной установки спектрометрии излучения человека (СИЧ). Это позволяет объективно определять поглощенную активность в щитовидной железе (ЩЖ). Строгое соблюдение принципа оптимизации радиационной защиты ALARA [15] требует не только выполнения базовых санитарно-гигиенических норм, но и проведения детального, непрерывного анализа данных индивидуального дозиметрического контроля (ИДК).

Мировые исследования демонстрируют значительный разброс дозовых нагрузок персонала. Европейские центры сообщают о среднем годовом уровне внешних доз около 0,3-2,1 мЗв, но при работе с радионуклидом ^{131}I фиксируются пики до десятков

микрозиверт за манипуляцию [18]. Национальное законодательство Республики Казахстан, включая Приказ Министра здравоохранения «Об утверждении гигиенических нормативов к обеспечению радиационной безопасности», гармонизировано с этими глобальными стандартами. Однако, учитывая статус КГП на ПХВ «Центр ядерной медицины и онкологии» (ЦЯМ и О) как первого центра в стране, начавшего терапевтическое применение ^{131}I в 2021 году, функционирующего в условиях роста клинической нагрузки, возникает острая необходимость в комплексном исследовании, подтверждающем или корректирующем применение общих нормативов в специфических локальных условиях, особенно при работе с жидкой формой радиоактивного йода ^{131}I . Детальное изучение и количественная оценка дозовых нагрузок, включающая как внешний, так и внутренний компонент, позволяют определить ключевые этапы технологического процесса, где необходимы дополнительные меры защиты.

Актуальность настоящего исследования продиктована необходимостью эмпирического обоснования и совершенствования мер радиационной защиты в условиях медицинского центра, работающего с жидкой формой ^{131}I , и обусловлена потребностью в объективной оценке эффективности действующих ИДК в реальной клинической практике. Особую актуальность приобретает изучение индивидуальной вариативности захвата ^{131}I щитовидной железой персонала, обусловленного состоянием ее функции и сопутствующей эндокринной патологией, что является неконтролируемым фактором риска в стандартных протоколах защиты. Научная гипотеза исследования заключается в том, что при соблюдении регламентов радиационной безопасности, индивидуальные показатели внутреннего облучения персонала при работе с радиоактивным йодом-131 формируются преимущественно под влиянием функционального состояния щитовидной железы и особенностей гормональной регуляции, тогда как вклад профессиональной внешней дозовой нагрузки носит вторичный характер.

Целью настоящего исследования является проведение ретроспективного анализа индивидуальных дозовых нагрузок персонала, работающего с ^{131}I в отделении ядерной медицины, за период с 2022 по 2025 год, а также разработка научно обоснованных организационно-технических рекомендаций, направленных на снижение эффективной и эквивалентной доз облучения персонала до минимально достижимого уровня с учетом выявленной зависимости показателей внутреннего облучения от индивидуального эндокринного статуса. Для достижения поставленной цели в работе проанализированы данные ИДК внешнего облучения и СИЧ внутреннего облучения, идентифицированы наиболее дозообразующие этапы технологического процесса, оценена эффективность

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПЕРСОНАЛА,
РАБОТАЮЩЕГО С ^{131}I В УСЛОВИЯХ РАДИОНУКЛИДНОЙ ТЕРАПИИ И ДИАГНОСТИКИ:
АНАЛИЗ РЕГУЛЯТОРНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ И СНИЖЕНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РИСКОВ**

существующих средств защиты и предложен комплекс профилактических мер, основанных на принципах защиты временем, расстоянием и экранированием.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследуемая когорта и дизайн исследования

Настоящее исследование представляет собой ретроспективный анализ данных индивидуального дозиметрического контроля персонала группы А, работающего с открытыми источниками ^{131}I в Центре ядерной медицины и онкологии. Анализ данных охватывает период с 2022 по 2025 год, с акцентом на детальный мониторинг за последние шесть месяцев 2025 года.

Объектом исследования были 20 сотрудников группы А, которые были разделены на две ключевые профессиональные подгруппы, наиболее подверженные риску внутреннего и внешнего облучения при работе с жидкой формой ^{131}I :

– в первую подгруппу вошли медицинские сестры отделения радионуклидной терапии (ОРНТ) и радиофармацевты – 12 человек. У них превалировал внутренний источник облучения (ингаляционное по-

ступление при фасовке и выдаче радиофармацевтического лечебного препарата (РФЛП), а также внешнее облучение и локальное облучение кистей рук и хрусталиков глаза для радиофармацевтов.

– во вторую подгруппу вошли медицинские сестры и рентген-лаборанты отделения радионуклидной диагностики – 8 человек, основным источником облучения у которых было внешнее воздействие (при сопровождении и укладке пациентов ОРНТ);

Критерием включения в когорту мониторинга являлось постоянное выполнение профессиональных обязанностей на критических этапах технологического цикла лечения, продиктованного схемой терапии радиоактивным йодом. Данный цикл включает: пероральное введение радиоактивного йода (этап фасовки и выдачи), пятидневную госпитализацию пациента в специализированной «активной» палате ОРНТ (этап ухода) и проведение скintiграфии всего тела (СВТ) на аппарате однофотонной эмиссионной компьютерной томографии, совмещенной с рентгеновской компьютерной томографией (ОФЭКТ/КТ) в отделении радионуклидной диагностики (ОРНД) на 3-4 день. Таким образом, персонал обеих групп подвергался облучению на протяжении всего технологического цикла, что и послужило основанием для их включения в когорту мониторинга. Для наглядного представления технологической цепочки, связанной с дозовыми нагрузками, была разработана схема технологического процесса работы с ^{131}I (Рисунок 1), отражающая ключевые этапы от приема РФЛП до утилизации отходов.

Методы оценки внутреннего облучения и дозиметрия

Основным методом оценки внутреннего облучения, обусловленного инкорпорацией ^{131}I в щитовидную железу, была спектрометрия излучения человека (СИЧ).

Поглощенная активность в ЩЖ определялась с помощью спектрометрической установки CAPTUS 4000e (Capintec, США), изображенном на Рисунке 2. Прибор оснащен сцинтилляционными кристаллами NaI(Tl) (активированного таллием иодида натрия) и фотомножительными трубками. Энергетическая калибровка и контроль стабильности работы системы выполнялись по контрольному источнику ^{137}Cs ($E_\gamma=662\text{кэВ}$). Измерение содержания радиоiodа у персонала проводилось по основному характеристическому фотопику ^{131}I ($E_\gamma=364\text{кэВ}$) в энергетическом диапазоне от $E_{\min} = 32\text{кэВ}$ до $E_{\max} = 662\text{кэВ}$, согласно руководству по эксплуатации [19].

Определение активности ЩЖ проводилось через 24–48 часов после работ с радионуклидом ^{131}I . Данный временной интервал выбран для обеспечения максимального захвата поступившего йода щитовидной железой [15]. На основе измеренной активности в ЩЖ рассчитывалась ожидаемая поглощенная доза внутреннего облучения $E(50)$, с использованием до-

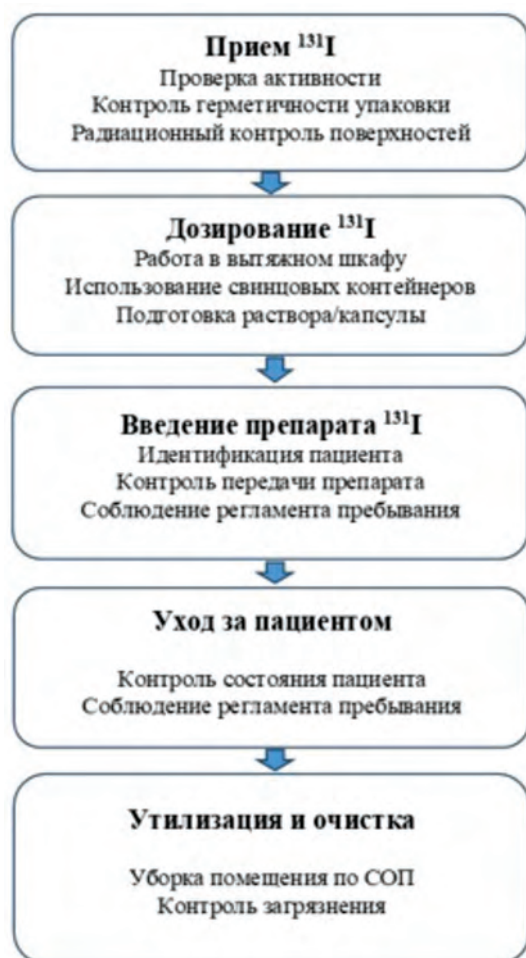


Рисунок 1. Схема технологического процесса работы с ^{131}I

зовых коэффициентов, утвержденных в соответствии с гигиеническими нормативами Республики Казахстан [20]. Эквивалентная доза для щитовидной железы ($H_{\text{щж}}$) рассчитывалась как промежуточный этап оценки с применением взвешивающих коэффициентов для тканей согласно методологии, изложенной в Публикации 137 МКРЗ [7].



Рисунок 2. Процедура измерения йодного поглощения щитовидной железой на спектрометрическом комплексе CAPTUS 4000e.

Комплексный радиационный контроль

В ЦЯМ и О для обеспечения радиационной безопасности при работе с ^{131}I осуществляется обязательный комплекс радиационного контроля в соответствии с санитарно-эпидемиологическими требованиями [13]. Ниже приводится перечень основных компонентов радиационного контроля:

- ИДК внешнего облучения осуществляется с использованием термолюминесцентных дозиметров: DTU – для дозы всего тела, EYE-D – для дозы хрусталика глаз, Finger – для дозы кожи пальцев;

- мониторинг мощностей дозы и радиационного фона проводился непрерывно с использованием автоматизированной системы радиационного контроля СРК АТ-2327 (16 детекторов: 15 установлены в палатах, 1 – в процедурном помещении);

- контроль на рабочих местах проводился с помощью дозиметра ДКС АТ-1121. Измерения выполнялись в начале и в конце каждого рабочего дня на всех рабочих местах, связанных с обращением радиоактивного йода;

- контроль мощности дозы у пациентов осуществлялся с помощью системы измерения мощности дозы DLMon. Установлено 15 детекторов над кроватями пациентов. Система использовалась для контроля мощности дозы (МД) на расстоянии 1 метра от пациента, начиная с момента выдачи РФЛП и до выписки;

- контроль поступления радионуклида по воздуху проводился с использованием портативного расходомера-пробоотборника газоаэрозольных смесей ПВП-06 с фильтрами АФА-РСП-20. Измерения вы-

полнялись во время выдачи радиоактивного йода в процедурном помещении для оценки возможного поступления радионуклида по воздушному пути;

- контроль поверхностного радиоактивного загрязнения персонала проводился с помощью дозиметра-радиометра МКС АТ-1117М с блоком детектирования (БД). Измерения выполнялись по окончании процедуры выдачи пациентам ^{131}I у работников, участвующих в фасовке и сопровождении пациента, включая контроль открытых участков тела, одежды и средства индивидуальной защиты (СИЗ);

- СИЗ персонала, участвующего в процессе выдачи радиофармпрепарата и сопровождения пациентов: жилет с юбкой (свинцовый эквивалент $\geq 0,25$ мм Pb), односторонние и двусторонние фартуки, защитные воротники, шапочки и очки. Все СИЗ проходят проверку на эффективность свинцового эквивалента один раз в два года [13].

Радиационная безопасность при работе с высокими активностями ^{131}I со строгим зонированием помещений и наличием систем для выдержки жидких радиоактивных отходов (РАО) обеспечивалась в соответствии с санитарными правилами [21].

Статистический анализ

Статистический анализ дозиметрических данных проводился с использованием стандартных методов описательной статистики. Были рассчитаны ключевые параметры распределения – среднее арифметическое значение $\bar{x}$, а также минимальные и максимальные значения. Основной целью анализа являлось сравнение полученных фактических индивидуальных эффективных доз E_{50} и поступления активности с нормативными значениями, установленными в соответствии с гигиеническими нормативами Республики Казахстан, а также оценка соответствия дозовых нагрузок принципу оптимизации (ALARA).

Результаты

Комплексный анализ данных ИДК персонала, работающего с открытыми источниками ^{131}I , показал, что при существующей организации технологического процесса все зарегистрированные значения дозовых нагрузок находятся в пределах действующих нормативов радиационной безопасности. При этом полученные результаты позволили детально охарактеризовать структуру внешнего и внутреннего облучения персонала, а также выявить особенности распределения дозовых нагрузок в зависимости от профессиональных функций и условий работы.

По данным операционного мониторинга установлено, что средневзвешенная активность радиофармпрепарата, обрабатываемая в ходе одной смены, составляет 53,83 ГБк при проведении радионуклидной терапии и 1,64 ГБк при выполнении диагностических процедур. Эти значения отражают суммарную клиническую нагрузку отделений и не являются прямым

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПЕРСОНАЛА, РАБОТАЮЩЕГО С ¹³¹I В УСЛОВИЯХ РАДИОНУКЛИДНОЙ ТЕРАПИИ И ДИАГНОСТИКИ: АНАЛИЗ РЕГУЛЯТОРНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ И СНИЖЕНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РИСКОВ

Таблица 1. Сравнительная оценка операционных нагрузок и внешней мощности дозы в критических точках технологического цикла (6 месяцев 2025 г.)

Профессиональная группа	Доминирующий этап работы	Средняя мощность дозы в точке измерения* (мЗв/ч)	Фактор, определяющий уровень нагрузки
Радиофармацевты (Группа 1)	Фасовка и выдача жидкого ¹³¹ I	4,66	Риск локального облучения и потенциального ингаляционного поступления.
Персонал ОРНТ (Группа 1)	Выдача РФЛП и уход за пациентами	3,34	Пребывание рядом с пациентом-источником.
Персонал ОРНД (Группа 2)	Сопровождение и укладка пациентов на ОФЭКТ/КТ	8,39 · 10 ⁻³	Внешнее облучение от пациента-источника после терапии.

* Примечание: значения МЭД получены в ходе рабочего процесса по результатам прямых измерений, выполненных показывающими дозиметрами.

показателем индивидуальной дозы персонала, формирование которой определяется временем контакта, расстоянием до источника и инженерными характеристиками помещений. Анализ мощности эквивалентной дозы (МЭД), регистрируемой персональными дозиметрами в критических точках технологического цикла, выявил ожидаемую дифференциацию дозовых нагрузок между профессиональными группами (Таблица 1).

Установлено, что средние значения МЭД у персонала ОРНД существенно ниже по сравнению с аналогичными показателями персонала ОРНТ. Данное различие обусловлено особенностями организации лечебно-диагностического процесса: персонал ОРНД контактирует с пациентами, как правило, однократно и в ограниченный промежуток времени (это сопровождения и позиционирования при выполнении ОФЭКТ/КТ), тогда как персонал ОРНТ осуществляет постоянное пребывание с пациентами в течение всего посттерапевтического периода до их выписки, включая уход, наблюдение и сопровождение, что приводит к увеличению времени радиационного воздействия.

При этом зарегистрированные значения мощности дозы выражены в микрозивертном диапазоне и при пересчете на годовую эффективную дозу не приводят к превышению установленного предела 20 мЗв. Результаты мониторинга дозовой обстановки в «грязной зоне» отделения радионуклидной диагностики показали, что средние значения мощности дозы в воздухе составляют 2,46 мкЗв/ч на третьи сутки и 8,39 мкЗв/ч на четвертые сутки после проведения радиойодтерапии, что соответствует ожидаемым уровням внешнего облучения от пациентов-источников и не выходит за рамки санитарных норм.

Для оценки внутреннего облучения персонала проведен ретроспективный анализ данных СИЧ за период 2022–2025 гг. Сопоставление среднегодовых значений активности ¹³¹I, зарегистрированной в щитовидной железе, с нормативной величиной предела годового поступления (ПГП = 2,6 МБк/год) показало следующую динамику (Таблица 2).

Таблица 2. Среднегодовая активность ¹³¹I в щитовидной железе персонала

Период	Среднегодовая активность, кБк
2022 год	0,068
2023 год	0,151
2024 год	1,522
2025 год	4,837

Полученные данные свидетельствуют, что даже максимальное зарегистрированное среднегодовое значение активности ¹³¹I в щитовидной железе персонала составляет менее 0,3 % от установленного предела годового поступления, что подтверждает отсутствие превышений нормативных уровней и наличие значительного запаса по радиационной безопасности. Визуализация динамики (Рисунок 3) демонстрирует, что нормативный ПГП находится за пределами используемого масштаба оси, что подчеркивает его ограниченную чувствительность к регистрации малых, но систематически повторяющихся поступлений радионуклида, представляющих интерес преимущественно с позиций оптимизации условий труда.



Рисунок 3. Динамика среднегодовой активности ¹³¹I в щитовидной железе персонала в сравнении с нормативами

Детализированный анализ данных спектрометрии излучения человека показал, что низкоуровневые значения активности ¹³¹I, регистрируемые у части пер-

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПЕРСОНАЛА,
РАБОТАЮЩЕГО С ^{131}I В УСЛОВИЯХ РАДИОНУКЛИДНОЙ ТЕРАПИИ И ДИАГНОСТИКИ:
АНАЛИЗ РЕГУЛЯТОРНЫХ ОГРАНИЧЕНИЙ И СНИЖЕНИЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ РИСКОВ**

сонала ОРНД, вероятнее всего, формируются за счет вторичного присутствия радионуклида в клинической среде при работе с пациентами в посттерапевтический период. Это подтверждается выявлением следовых уровней активности в щитовидной железе медицинских сестер при отсутствии непосредственного контакта с жидкой формой ^{131}I . Возможным объяснением таких фоновых величин является естественное выведение крайне малых количеств радиоактивного йода пациентами с выдыхаемым воздухом и кожными выделениями во время диагностических процедур. Согласно международным рекомендациям МАГАТЭ и МКРЗ, подобные процессы рассматриваются как ожидаемое сопутствующее явление при работе с летучими радионуклидами и не интерпретируются как индикатор радиационного риска или несоответствия требованиям радиационной безопасности [16].

АНАЛИЗ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

В продолжение анализа общих дозиметрических характеристик была выполнена оценка индивидуальных наблюдений, направленная на выявление роли физиологических факторов и состояния щитовидной железы в формировании низкоуровневой инкорпорации ^{131}I у персонала. Представленные ниже клинические случаи не рассматриваются как отклонения от норм радиационной безопасности, а используются в качестве иллюстрации индивидуальной вариабельности показателей ИДК при сопоставимых условиях профессиональной деятельности.

Случай 1 (Рисунок 4). Особенности показателей ИДК при постоянной заместительной гормональной терапии.

Сотрудник с установленным диагнозом гипотиреоза, получающий постоянную заместительную терапию левотироксином (Эутирокс 75 мкг). Заместительная гормональная терапия направлена на компенсацию дефицита тиреоидных гормонов и снижение стимуляции щитовидной железы тиреотропным гормоном, что, как правило, сопровождается уменьшением захвата йода. Вместе с тем по данным дозиметрического контроля в отдельные периоды регистрировалось поступление ^{131}I в щитовидную железу с максимальным значением активности 4,990 кБк (январь). Данный результат указывает, что даже на фоне стабильной заместительной терапии сохраняется физиологическая способность щитовидной железы к захвату йода, что имеет значение для корректной интерпретации индивидуальных дозиметрических данных. Наблюдение подчеркивает обоснованность регулярного мониторинга для всего персонала группы А, включая сотрудников, находящихся на гормональной коррекции.

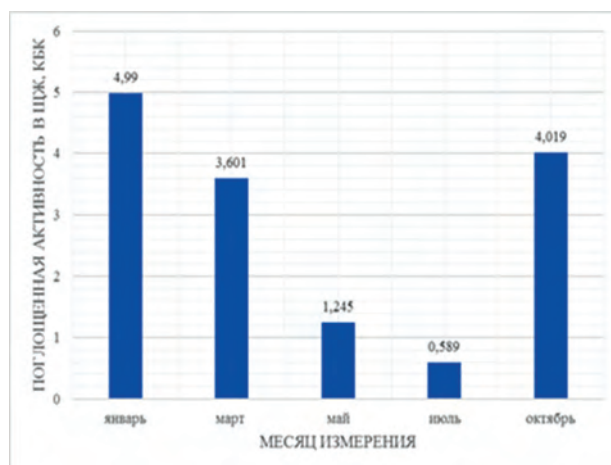


Рисунок 4. Динамика значений активности ^{131}I в щитовидной железе для Сотрудника №1

Случай 2 (Рисунок 5). Особенности показателей индивидуального дозиметрического контроля при временной коррекции гормонального статуса

Сотрудник с гипотиреозом, получавший левотироксин (Эутирокс 25 мкг) в течение ограниченного периода (три месяца с июля по сентябрь). По результатам ИДК зафиксировано кратковременное увеличение активности ^{131}I в щитовидной железе с пиковым значением 5,392 кБк в июне, совпадающее по времени с последующим периодом изменения режима терапии. В дальнейшем, после завершения курса лечения, отмечено повторное, но менее выраженное увеличение активности (2,667 кБк в октябре). Подобная динамика отражает влияние гормональной регуляции функции щитовидной железы на захват йода и свидетельствует о чувствительности показателей ИДК к изменениям эндокринного статуса. В условиях профессионального контакта с ^{131}I это требует учета клинического фона при интерпретации результатов мониторинга, но не указывает на превышение нормативных уровней.

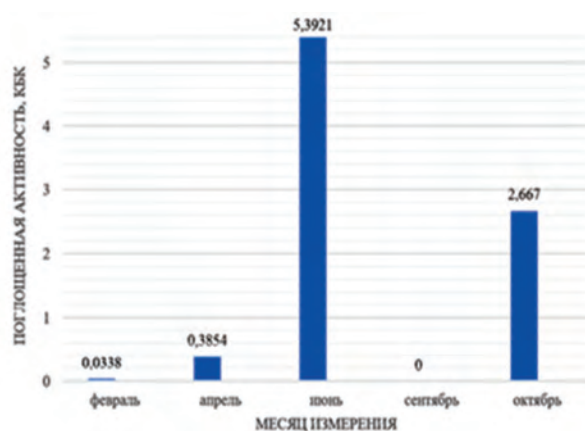


Рисунок 5. Динамика значений активности ^{131}I в щитовидной железе для Сотрудника №2

Случай 3 (Рисунок 6). Особенности показателей индивидуального дозиметрического контроля при воспалительных изменениях щитовидной железы.

Клинический фон сотрудника №3 связан с проведенным углубленным обследованием функции щитовидной железы, по результатам которого выявлены признаки тиреоидита (аутоиммунного воспалительного процесса). По данным индивидуального дозиметрического контроля за последние 6 месяцев зарегистрировано увеличение измеренной активности ^{131}I в щитовидной железе с максимальным значением 48,536 кБк (октябрь). Выявленные воспалительные изменения ткани щитовидной железы могут сопровождаться повышенной способностью органа к захвату йода, что является вероятным объяснением наблюдаемой динамики показателей. Следует подчеркнуть, что даже при данном уровне активности значения остаются существенно ниже установленного предела годового поступления и не приводят к увеличению годовой эффективной дозы.

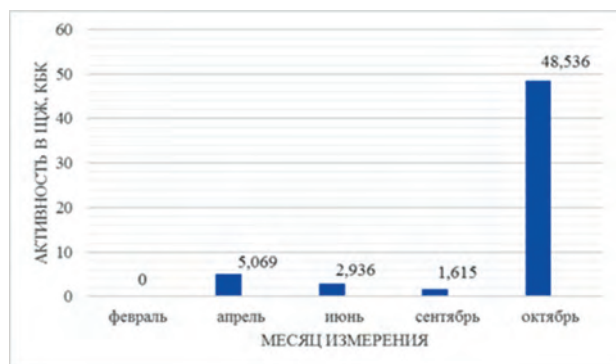


Рисунок 6. Динамика значений активности ^{131}I в щитовидной железе для Сотрудника №3

Проведенный анализ показал, что вариабельность показателей индивидуального дозиметрического контроля в большей степени обусловлена функциональным состоянием щитовидной железы и клиническими особенностями персонала, чем различиями во внешней дозовой нагрузке при соблюдении регламентированных условий труда. Представленные клинические наблюдения подтверждают влияние эндокринного статуса, характера и стабильности заместительной гормональной терапии, а также наличия воспалительных изменений ткани органа на уровни регистрируемой активности ^{131}I . Полученные данные подчеркивают значимость учета клинического фона при интерпретации результатов ИДК и подтверждают роль планового медицинского наблюдения как составной части системы радиационной защиты.

Обсуждение

Проведенное исследование индивидуальных дозиметрических показателей персонала, работающего с ^{131}I в отделениях радионуклидной терапии и радио-

нуклидной диагностики, показало, что эффективные дозы во всех наблюдаемых случаях соответствуют установленному годовому пределу (20 мЗв). Полученные данные подтверждают, что действующая система радиационной защиты обеспечивает стабильное соблюдение нормативных требований и поддерживает профессиональные дозовые нагрузки на уровнях, существенно ниже предельных значений.

Научная значимость настоящего исследования заключается не в выявлении превышений, а в более глубоком анализе факторов, формирующих индивидуальные показатели дозиметрического контроля в условиях клинической практики. В частности, показано, что при формальном соблюдении нормативных ограничений вариабельность показателей ИДК определяется не только особенностями профессиональной деятельности, но и индивидуальными физиологическими и клиническими характеристиками персонала.

Отдельного внимания заслуживает анализ применимости нормативной величины предела годового поступления (ПГП) для задач практической оптимизации. Поскольку фактически регистрируемые уровни активности ^{131}I находятся на порядки ниже установленного ПГП, данная величина выполняет свою функцию как защитный норматив, однако обладает ограниченной информативностью в качестве оперативного инструмента для реализации принципа оптимизации радиационной защиты. В этой связи представляется целесообразным рассматривать индивидуальный дозиметрический контроль не как механизм выявления превышений, а как инструмент наблюдения и анализа низкоуровневых, физиологически обусловленных вариаций. Структурный анализ дозовых нагрузок показал, что распределение доз внутри персонала группы А не является полностью однородным, что соответствует данным международных исследований. Небольшие различия между профессиональными группами обусловлены характером выполняемых функций, прежде всего длительностью и частотой контакта с пациентами в первые часы после введения радиофармацевтического препарата. При этом выявленные особенности не выходят за рамки ожидаемых и не сопровождаются увеличением годовой эффективной дозы.

Анализ клинических наблюдений продемонстрировал, что функциональное состояние щитовидной железы и особенности гормональной регуляции оказывают значимое влияние на показатели внутреннего облучения, даже при сопоставимых условиях труда. Заместительная гормональная терапия снижает, но не полностью исключает физиологическую способность щитовидной железы к захвату йода, а воспалительные изменения ткани органа могут сопровождаться более выраженной вариабельностью показателей ИДК. Эти наблюдения подчеркивают необходимость учитывать клинический фон персонала при интер-

претации результатов дозиметрического контроля и подтверждают роль планового медицинского наблюдения как важного элемента системы радиационной защиты. Таким образом, результаты исследования расширяют представления о факторах, формирующих индивидуальные дозиметрические показатели, и подчеркивают, что эффективный подход, основанный на оптимизации дозовых нагрузок в клинических условиях, требует не только соблюдения нормативов, но и взвешенной интерпретации данных с учетом физиологических особенностей персонала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ индивидуального дозиметрического контроля персонала, работающего с ¹³¹I, показал, что действующая система радиационной защиты Центра ядерной медицины и онкологии области Абай обеспечивает надежное соблюдение международных и национальных требований и поддерживает профессиональные дозовые нагрузки значительно ниже установленных пределов. Это свидетельствует о корректной организации рабочих процессов и эффективности базовых мер радиационной безопасности. Выявленные в ходе исследования индивидуальные колебания активности ¹³¹I в щитовидной железе персонала носят характер низкоуровневых, контролируемых величин и не оказывают существенного влияния на годовую эффективную дозу. Эти колебания отражают, прежде всего, индивидуальные особенности функции щитовидной железы, характер гормональной регуляции и клинический фон сотрудников, а также специфику кратковременных контактов с пациентами в первые часы после диагностических и терапевтических процедур. По данным международных публикаций, подобные наблюдения являются ожидаемыми при работе с радиоактивным йодом и не рассматриваются как индикатор повышенного радиационного риска.

Вместе с тем, полученные результаты указывают на перспективные направления для дальнейшего совершенствования системы радиационной защиты, направленного на повышение ее устойчивости и предсказуемости. К таким направлениям относятся мягкая оптимизация инженерных решений (корректировка режимов воздухообмена и отрицательного давления в отдельных помещениях), а также развитие практики интерпретации данных ИДК с учетом клинического статуса персонала. Подобные меры не направлены на устранение выявленных угроз, а служат инструментом дополнительного повышения комфорта и технологической стабильности работы подразделений. В целом результаты исследования подтверждают, что индивидуальный дозиметрический контроль является не только регуляторным, но и аналитическим инструментом, позволяющим глубже понимать механизмы формирования дозовых нагрузок и использовать полученные данные для планомерной оптимизации ра-

бочих процессов в рамках принципа ALARA. Реализация предложенных подходов будет способствовать дальнейшему укреплению системы радиационной безопасности и формированию устойчивой, научно обоснованной модели защиты персонала в условиях современной ядерной медицины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rais J., Gambhir S., Dixit M. The role of ¹³¹I in the treatment and management of thyroid cancer // *Current Radiopharmaceuticals* – 2026 – 19 (1) – art. no. 100009. doi: 10.1016/j.craph.2025.100009
2. F. Eilsberger, A. Pfestroff // *Theranostics in thyroid cancer - PET Clin.* – 2021. - 16 (3) - pp. 375-382. doi: 10.1016/j.cpet.2021.03.007
3. Fakih TM, Novitasari D, Syaifudin M, Meiyanto E, Astirin OP, Mohd Gazzali A, Muchtaridi M. Role of Radioiodine in Cancer Therapy: A Review of the Design and Challenges in Selecting Radioligands from Natural Sources. // *Drug Des Devel Ther.* – 2025 – 19 – PP. 8009-8039. doi: 10.2147/DDDT.S524612.
4. Liu G, Li Y, Zhang H, Zhang X, Liu YY, Wu XQ, Niu LM, Zhang R. Thyroid dose assessments due to inhalation of ¹³¹I for nuclear medicine workers. // *Front Public Health.* – 2022. - 10:1027782. doi: 10.3389/fpubh.2022.1027782.
5. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103 // *Ann ICRP.* – 2007. - 37(2-4) - 1-332. doi: 10.1016/j.icrp.2007.10.003. PMID: 18082557.
6. Krajewska G, Krajewski P. Evaluation of internal exposure of nuclear medicine staff working with radioiodine in Poland. // *Int J Occup Med Environ Health.* – 2023 - 36(5) – PP. 587-595. doi: 10.13075/ijom.1896.02136.
7. ICRP, 2017. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. Ann. ICRP 46(3/4). <https://www.icrp.org/page.asp?id=5>
8. ICRP, 2015. Occupational Intakes of Radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130. Ann. ICRP 44(2). https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_44_2
9. Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation, IAEA Safety Standards, safety standards series, ISSN 1020-525X ; no. SSG-46, IAEA, Vienna, 2018 https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1775_web.pdf
10. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, effects and risks of ionizing radiation UNSCEAR 2024 Report. // ANNEX A: Second primary cancer after radiotherapy. - Volume I https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/unscear-reports/UNSCEAR_2024_Report_Vol.I.pdf
11. Mench A, Winters C, Mittra E, Szidonya L, Hess C, Barbon D, Mallak N. Navigating Radiation Safety After Radiopharmaceutical Therapies: Proposed Workflow and Essential Guidelines for Nonspecialists. // *J Nucl Med.* – 2025. – 66(7) – P. 990-994. doi: 10.2967/jnumed.124.268522.
12. О радиационной безопасности населения : закон Республики Казахстан от 23 апреля 1998 года № 219-І (с изменениями и дополнениями по состоянию на 2025 г.). – Текст : электронный // Информационно-правовая система нормативных правовых актов РК «Әділет». – URL: adilet.zan.kz (дата обращения: 18.12.2025).

13. Об утверждении Санитарных правил «Санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению радиационной безопасности»: приказ Министра здравоохранения Республики Казахстан от 15 декабря 2020 года № ҚР ДСМ-275/2020 (с изменениями и дополнениями по состоянию на 2025 г.). – Текст : электронный // Информационно-правовая система нормативных правовых актов РК «Әділет». – URL: adilet.zan.kz (дата обращения: 18.12.2025).
14. ICRP, 2015. Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals: A Compendium of Current Information Related to Frequently Used Substances. ICRP Publication 128. – Ann. ICRP 44(2S).
15. Радиационная защита и безопасность источников излучения: Международные основные нормы безопасности : серия норм МАГАТЭ по безопасности № GSR Part 3. – Вена : МАГАТЭ, 2014. – 519 с.
16. Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation: Specific Safety Guide No. SSG-46. – Vienna: International Atomic Energy Agency (IAEA), 2019. – P. 318
17. Yoshitomi H, Nishino S, Tanimura Y, Takahashi M. A study of a calibration technique for a newly developed thyroid monitor and its uncertainties due to body size for radioiodine measurements. // Radiat Meas. – 2020 - 133:106279. doi: 10.1016/j.radmeas.2020.106279.
18. Struelens L, Aalbersberg E, Beels L, Cherbuin N, D'Asseler Y, De Monte F. [et al.] How much do ^{68}Ga -, ^{177}Lu - and ^{131}I -based radiopharmaceuticals contribute to the global radiation exposure of nuclear medicine staff? // EJNMMI Phys. – 2024 - 11(1):95. doi: 10.1186/s40658-024-00695-3.
19. CAPTUS 4000e Thyroid Uptake System. Operator's Manual: [Руководство оператора системы захвата щитовидной железы CAPTUS 4000e]. – Ramsey, NJ: Capintec, Inc., 2015. – P. 240
20. Об утверждении Гигиенических нормативов к обеспечению радиационной безопасности : Приказ Министра здравоохранения Республики Казахстан от 2 августа 2022 года № ҚР ДСМ-71. – Текст : электронный // Информационно-правовая система нормативных правовых актов РК «Әділет». – URL: adilet.zan.kz (дата обращения: 18.12.2025).
21. Об утверждении Санитарных правил «Санитарно-эпидемиологические требования к радиационно-опасным объектам»: приказ Министра здравоохранения Республики Казахстан от 25 августа 2022 года № ҚР ДСМ-90. – Текст : электронный // Информационно-правовая система нормативных правовых актов РК «Әділет». – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2200029292> (дата обращения: 18.12.2025).

РАДИОНУКЛИДТІК ТЕРАПИЯ ЖӘНЕ ДИАГНОСТИКА ЖАҒДАЙЫНДА ^{131}I -МЕН ЖҰМЫС ІСТЕЙТІН ПЕРСОНАЛДЫҢ ЖЕКЕ ДОЗИМЕТРИЯЛЫҚ БАҚЫЛАУ ТИІМДІЛІГІН БАҒАЛАУ: РЕТТЕУШІ ШЕКТЕУЛЕРДІ ТАЛДАУ ЖӘНЕ КӘСІБИ ТӘУЕКЕЛДЕРДІ ТӨМЕНДЕТУ

А. К. Дауменова¹, С. З. Танатаров¹, Б. Ж. Атантаева¹, М. Т. Идинов^{1,2},
Д. Н. Адильбаев¹, Б. Е. Дауменов^{1,2}, Р. Р. Ролланұлы¹, Д. Б. Кенжина^{3*}

¹ Абай облысының Ядролық медицина және онкология орталығы, Семей, Қазақстан,

² Шәкәрім университеті, Семей, Қазақстан,

³ Радиациялық қауіпсіздік және экология институтының филиалы, Курчатов, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: laurakenzhina@yandex.kz

Бұл жұмыста радионуклидтік терапия және диагностика жағдайында радиоактивті йод-131 (^{131}I)-мен жұмыс істейтін А санатындағы персоналдың (n = 20) жеке дозалық жүктемелерінің қалыптасу ерекшеліктері зерттелді. Зерттеудің мақсаты – Абай облысының Ядролық медицина және онкология орталығының нақты клиникалық тәжірибесінде сыртқы және ішкі сәулеленуді талдау кезінде жеке дозиметриялық бақылаудың ақпараттық құндылығын бағалау. Жеке дозиметриялық бақылау деректері мен адам сәулеленуін спектрометриялық өлшеу нәтижелеріне негізделген ретроспективтік талдау арқылы персоналдың қалқанша безіндегі ^{131}I белсенділігінің өзгергіштігі және оның жылдық тиімді дозаның қалыптасуына қосатын үлесі зерделенді. Радиациялық қауіпсіздік регламенттері сақталған жағдайда кәсіби дозалық жүктемелер белгіленген нормативтік шектерден едәуір төмен деңгейде қалатыны көрсетілді. Сонымен қатар ішкі сәулелену көрсеткіштеріндегі айырмашылықтар кәсіби қызмет жағдайларына қарағанда, қалқанша без функциясының жеке клиникалық-физиологиялық ерекшеліктерімен тығыздық байланысты екені анықталды. Алынған нәтижелер жеке дозиметриялық бақылауды тек реттеуші құрал ретінде ғана емес, сонымен қатар дозалық жүктемелердің қалыптасу механизмдерін тереңірек түсіндіруге және ALARA қағидаты аясында радиациялық қорғаныс жүйесін одан әрі оңтайландыру бағыттарын негіздеуге мүмкіндік беретін аналитикалық құрал ретінде қарастыруға болатынын көрсетеді.

Түйін сөздер: қалқанша без, радиоактивті йод (^{131}I), радиойодтерапия, жеке дозиметриялық бақылау, радиациялық қауіпсіздік, сәулелену дозасы, радионуклидтік диагностика, персоналдың дозалық жүктемелері, ALARA.

ASSESSMENT OF THE EFFECTIVENESS OF INDIVIDUAL DOSIMETRIC CONTROL OF
PERSONNEL WORKING WITH ^{131}I UNDER CONDITIONS OF RADIONUCLIDE THERAPY
AND DIAGNOSTICS: ANALYSIS OF REGULATORY LIMITATIONS AND REDUCTION OF
OCCUPATIONAL RISKS

A. K. Daumenova¹, S. Z. Tanatarov¹, B. Zh. Atantaeva¹, M. T. Idinov^{1,2},
D. N. Adilbaev¹, B. E. Daumenov^{1,2}, R. Rollanuly¹, L. B. Kenzhina^{3*}

¹ Center for Nuclear Medicine and Oncology, Abai Region Health Department, Semey, Kazakhstan

² Shakarim University, Semey, Kazakhstan

³ Branch of the Institute of Radiation Safety and Ecology,
National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

* E-mail for contacts: laurakenzhina@yandex.kz

This study investigates the characteristics of individual dose formation in Category A personnel ($n = 20$) working with radioactive iodine-131 (^{131}I) under conditions of radionuclide therapy and diagnostics. The aim of the study was to assess the informative value of individual dosimetric monitoring for the analysis of both external and internal exposure in the real clinical practice of the Center of Nuclear Medicine and Oncology of the Abai Region. Based on a retrospective analysis of individual dosimetric monitoring data and in vivo spectrometry measurements, the variability of ^{131}I activity in the thyroid gland of personnel and its contribution to the annual effective dose were evaluated. It was demonstrated that, when radiation safety regulations are complied with, occupational dose levels remain significantly below established regulatory limits. At the same time, differences in internal exposure indicators were found to be more strongly associated with individual clinical and physiological characteristics of thyroid function than with the conditions of professional activity. The obtained results demonstrate that individual dosimetric monitoring can be considered not only a regulatory tool but also an analytical instrument that enables deeper interpretation of dose formation mechanisms and supports the justification of further optimization of radiation protection systems in accordance with the ALARA principle.

Keywords: thyroid gland, radioactive iodine (^{131}I), radioiodine therapy, individual dosimetric monitoring, radiation safety, radiation dose, radionuclide diagnostics, occupational dose exposure, ALARA.