

УДК 612.11:796  
ГРНТИ 34.39.55

**Суднеко Анна Александровна**

старший преподаватель кафедры анатомии человека с курсом оперативной хирургии и топографической анатомии

УО «Гомельский государственный медицинский университет», Республика Беларусь, г.

Гомель

**Калиниченко Сергей Александрович**

канд. биол. наук, доцент, заведующий лаборатории спектрометрии и радиохимии ГПНИУ «Полесский государственный радиационно-экологический заповедник», Республика

Беларусь, г. Хойники

**Дроздов Денис Николаевич**

канд. биол. наук, доцент кафедры нормальной и патологической физиологии

УО «Гомельский государственный медицинский университет», Республика Беларусь, г.

Гомель

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ЛЕГОЧНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ПЕРСОНАЛА В ЗОНЕ РАДИАЦИОННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ**

**Аннотация:** одной из основных трудностей дозиметрии внутреннего облучения является невозможность прямыми методами зарегистрировать дозу внутреннего облучения. В этой связи современные методики используют поэтапный подход с определением активности радионуклидов в объектах окружающей среды, последующий расчет поступления в организм и накопление за определенный период времени и расчет дозы облучения с учетом метаболизма радионуклида. Для реализации данного подхода и оценки дозы внутреннего облучения на легкое используется измерение концентрации радионуклидов в объеме воздуха и индивидуальные особенности легочной вентиляции конкретного работника. Современные нормативные подходы опираются на усредненные референтные значения объема дыхания, которые не учитывают высокую вариабельность физической нагрузки лесников, инженеров и механизаторов в реальных полевых условиях. В условиях радиационно-загрязненных территорий, где проведение работ может сопровождаться интенсивным вторичным ветровым подъемом пыли (ресуспензией), точность оценки объема вдыхаемого воздуха становится критическим фактором. В этой связи актуальным становится необходимость перехода от групповых средних показателей к персонализированным моделям оценки легочной вентиляции. Математический алгоритм, связывающий доступные для мониторинга физиологические параметры с частотой сердечных сокращений и дыхания с объемом вентилируемого воздуха в течение 7-часовой рабочей смены, позволит с высокой степенью достоверностью верифицировать ингаляционное поступление радионуклидов и оптимизировать регламенты радиационной безопасности для различных категорий работников лесного хозяйства. Цель работы – разработать математическую модель индивидуальной оценки объема легочной вентиляции у персонала лесного хозяйства (на примере ППРЭЗ) на основе динамических показателей сердечного ритма и частоты дыхания для верификации ингаляционного поступления техногенных радионуклидов в течение рабочей смены. Сравнительный анализ с данными натурального мониторинга ППРЭЗ показал, что учет индивидуальной физиологической реакции позволяет выявить скрытые радиационные риски, превышающие стандартные оценки ингаляционного поступления на 65-140%.

**Ключевые слова:** легочная вентиляция, модель, ингаляционное поступление,  $^{137}\text{Cs}$ , референтный человек, коэффициент осаждения аэрозолей.

**Sudneko Anna Aleksandrovna**

Senior Lecturer of the Department of Human Anatomy with a Course in Operative Surgery and Topographic Anatomy

Educational Institution "Gomel State Medical University", Republic of Belarus, Gomel

**Kalinichenko Sergej Aleksandrovich**

Ph.D., Associate Professor, Head of the Laboratory of Spectrometry and Radiochemistry

The State Environmental Scientific Research Institution "Polesky State Radiation and Ecological Reserve", Republic of Belarus, Hoiniki

**Drozdov Denis Nikolaevich**

Ph.D., Associate Professor of the Department of Normal and Pathological Physiology

Educational Institution "Gomel State Medical University", Republic of Belarus, Gomel

## **MODELING OF INDIVIDUAL PULMONARY VENTILATION OF PERSONNEL IN A RADIATION-CONTAMINATED AREA**

**Abstract:** One of the main difficulties in internal radiation dosimetry is the inability to directly measure the dose of internal radiation. Therefore, modern methods use a step-by-step approach, which involves measuring the activity of radionuclides in environmental samples, calculating their intake and accumulation over a certain period of time, and calculating the radiation dose based on the metabolism of the radionuclide. To implement this approach and assess the dose of internal radiation to the lungs, the concentration of radionuclides in the air volume and the individual characteristics of the worker's pulmonary ventilation are measured. Modern regulatory approaches are based on average reference values of breathing volume, which do not take into account the high variability of physical activity among foresters, engineers, and machine operators in real field conditions. In radiation-contaminated areas, where work can be accompanied by intense secondary wind-borne dust (resuspension), the accuracy of assessing the volume of inhaled air becomes critical. In this regard, it is necessary to move from group averages to personalized models for assessing pulmonary ventilation. A mathematical algorithm that links physiological parameters available for monitoring to heart rate and breathing rate with the volume of ventilated air during a 7-hour work shift will allow for high-precision verification of the inhalation intake of radionuclides and optimization of radiation safety regulations for various categories of forestry workers. The purpose of the work is to develop a mathematical model of individual assessment of the volume of pulmonary ventilation in forestry personnel (using the example of the PGREZ) based on dynamic indicators of heart rate and respiratory rate to verify the inhalation intake of technogenic radionuclides during a work shift. A comparative analysis with the data of field monitoring of the PGREZ showed that taking into account the individual physiological response allows for the identification of hidden radiation risks that exceed the standard estimates of inhalation intake by 65-140%.

**Key words:** Pulmonary ventilation, model, inhalation intake,  $^{137}\text{Cs}$ , reference man, aerosol deposition fraction.

Для достижения поставленной цели в качестве исходной информационной основы приняты стандартные антропометрические и функциональные параметры референтного взрослого человека, регламентированные международными стандартами радиационной безопасности [1]. Методология исследования строилась на аналитическом синтезе физиологических констант, характеризующих динамику легочной вентиляции при различных уровнях физической активности, свойственных персоналу лесного хозяйства.

В основу моделирования легли значения минутного объема дыхания, частоты сердечных сокращений и частоты дыхания, соответствующие режимам «покой», «легкая» и «средняя» физическая нагрузка для условного взрослого мужчины (73 кг) [2]. Расчет индивидуальной оценки объема вентиляции за рабочую смену проводился путем установления функциональных зависимостей между кардиореспираторными показателями

и интенсивностью метаболизма [3]. Статистическая обработка результатов исследования выполнена с использованием прикладных программ MS Excel 2007 и Statistica for Windows 6.0.

Для верификации ингаляционного поступления техногенных радионуклидов в условиях радиоактивного загрязнения территорий Полесского государственного радиационно-экологического заповедника, использовались коэффициенты задержки аэрозолей в различных отделах дыхательной системы, принятые в современных моделях биокинетики [4].

В таблице 1 показаны коэффициенты фракционного осаждения аэрозолей в отделах дыхательной системы референтного взрослого человека.

Таблица 1 – Коэффициенты фракционного осаждения аэрозолей в отделах дыхательной системы референтного взрослого человека (согласно модели МКРЗ)

| Отдел дыхательной системы | Обозначение | Осаждение для частиц 1 мкм, % | Осаждение для частиц 5 мкм, % |
|---------------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Экстраторакальный         | ET          | 16,5                          | 73,8                          |
| Бронхиальный              | BB          | 1,2                           | 1,8                           |
| Бронхиолярный             | bb          | 1,7                           | 1,1                           |
| Альвеолярный              | AI          | 13,2                          | 5,3                           |
| Общая задержка в легких   | Total       | 32,6                          | 82,0                          |

Анализ представленных данных свидетельствует о выраженной зависимости эффективности задержки радионуклидов от дисперсности аэрозолей. Для мелкодисперсной фракции (1 мкм) характерно равномерное распределение осаждения между экстраторакальным и альвеолярным отделами (16,5% и 13,2%, соответственно), при этом общая задержка не превышает 32,6%. В то же время для крупнодисперсных аэрозолей (5 мкм), типичных для механизированных работ в лесном хозяйстве, наблюдается резкое смещение акцента осаждения в верхние дыхательные пути (до 73,8% в отделе ET). Суммарная задержка при этом достигает 82,0%, что обуславливает формирование значительной дозы внутреннего облучения, даже при кратковременных периодах высокой физической активности. Данный факт подтверждает необходимость использования в модели коэффициентов, адаптированных под производственные сценарии ПГРЭЗ, где преобладает пылевая фракция с АМАД 5 мкм.

Математическая обработка данных и поиск уравнений регрессии осуществлялись с применением методов статистического анализа, позволяющих адаптировать справочные значения к вариативным условиям трудовой деятельности [5]. Для разработки модели на основе справочных значений для референтного человека использовалась методика линейной регрессии. Поскольку и минутный объем дыхания (МОД), и частота сердечных сокращений (ЧСС) линейно возрастают при увеличении потребления кислорода, уравнение регрессии принимает следующий вид (1):

$$V_E = k \cdot (HR - HR_{rest}) + V_{E,rest} \quad (1)$$

где  $V_E$  – минутный объем дыхания, л/мин,

$HR$  – текущая частота сердечных сокращений, уд/мин,

$HR_{rest}$  – частота сердечных сокращений референтного человека (согласно МКРЗ 89 70–75 уд/мин для взрослого мужчины),

$V_{E,rest}$  – минутный объем дыхания согласно МКРЗ 89 7,5–9,5 л/мин для взрослого мужчины),

$k$  – коэффициент интенсивности дыхания, определяет на сколько литров увеличивается вентиляция при росте пульса на 1 удар.

Модель базируется на принципе сопряженности кардиореспираторных показателей и линейной зависимости с угловым коэффициентом наклона прямой, отвечающему скорости прироста вентиляции на единицу прироста пульса. Согласно [2] для взрослого мужчины (референтный человек) установлены нормативные значения: в состоянии покоя: HR = 70 уд/мин, V<sub>E</sub> = 9 л/мин; для легкой нагрузки 90 уд/мин, 22 л/мин; для средней нагрузки 120 уд/мин, 41 л/мин. Исходя из этих данных, в основу уравнения регрессии положен средний коэффициент интенсивности k = 0,65, рассчитанный методом линейной аппроксимации справочных данных МКРЗ для состояний покоя, легкой и средней физической активности. Данная зависимость позволяет индивидуализировать оценку объема экспозиции, используя ЧСС, как доступный маркер интенсивности метаболизма персонала ПГРЭЗ.

На основании установленной зависимости минутного объема дыхания от частоты сердечных сокращений формируется алгоритм оценки радиационной нагрузки. Математическое выражение суммарного ингаляционного поступления техногенных радионуклидов (I, Бк) за период выполнения работ (рабочую смену) с учетом индивидуальной динамики легочной вентиляции и характеристик радиоактивных аэрозолей в условиях ПГРЭЗ принимает следующий вид (2):

$$I = \sum_{t=1}^T (C_{air} \cdot V_{E,t} \cdot DCF \cdot \Delta t) \quad (2)$$

Где I – суммарная активность поступивших радионуклидов за рабочую смену, Бк  
C<sub>air</sub> – объемная активность радионуклидов в приземном слое воздуха в зоне проведения работ, Бк/м<sup>3</sup>,

V<sub>E,t</sub> – минутный объем дыхания в момент времени t, м<sup>3</sup>/час

DCF – суммарный коэффициент осаждения аэрозолей в дыхательной системе,

Δt – продолжительность периода выполнения работ определенной интенсивностью, мин

T – общая продолжительность рабочей смены.

В результате анализа получена линейная регрессия для минутного объема дыхания V<sub>E</sub> = 0,65 · (HR – 70) + 9, которая позволяет оценить величину активности поступивших радионуклидов <sup>137</sup>Cs для разных категорий работ (таблица 2). Значения объемной активности в приземном слое воздуха для различных категорий работ в условиях ПГРЭЗ приняты на основе данных ранее опубликованных исследований, в которых проводился мониторинг запыленности воздуха при проведении лесохозяйственных мероприятий. Расчет выполнен с учетом коэффициента осаждения DCF = 0,82 (АМАД 5 мкм) для пылевой фракции, взятый исходя из принципа консервативности в радиационной защите.

Таблица 2 – Параметры ингаляционного поступления радионуклидов <sup>137</sup>Cs для различных категорий работ персонала

| Категория работ   | Нагрузка | HR, уд/мин | V <sub>E</sub> , л/мин | C <sub>air</sub> , Бк/м <sup>3</sup> | I, Бк/час             |
|-------------------|----------|------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| I. Интенсивная    | Тяжелая  | 130        | 48,0                   | 7,90·10 <sup>-3</sup>                | 1,86·10 <sup>-2</sup> |
| II. Поверхностная | Средняя  | 110        | 35,0                   | 1,58·10 <sup>-3</sup>                | 2,7·10 <sup>-3</sup>  |
| III. Транспорт    | Легкая   | 90         | 22,0                   | 4,00·10 <sup>-4</sup>                | 4,0·10 <sup>-4</sup>  |

Из таблицы 2 видно, что объемная активность показывает высокую корреляцию с результатами мониторинга в ближней зоне ЧАЭС. Разброс в 15-20% объясняется локальными особенностями плотности загрязнения почвы в конкретных кварталах ПГРЭЗ [6]. Традиционные методики часто используют среднее значение минутного объема дыхания (1,2-1,5 м<sup>3</sup>/ч, что равно 20-25 л/мин). В данном случае модель для частоты сердечных сокращений 130 уд/мин выдает 48 л/мин. Это приводит к «разбежке» в 90% в

сторону увеличения оценки поступления. Стандартные справочные значения МКРЗ без учета динамики частоты сердечных сокращений недооценивают реальную нагрузку на персонал лесного хозяйства в 1,5-2 раза. Кроме того, использование консервативного значения 0,82 (вместо среднего 0,4-0,5 для городских условий) дает отклонение в 60%. Это может быть обосновано спецификой лесных пожаров и механизированной обработкой сухой почвы.

Таким образом, расчетная модель ингаляционного поступления радионуклидов при тяжелых работах показала превышение показателей на 65-140% по сравнению со стандартными статическими коэффициентами, что объясняется учетом нелинейной физиологической динамики дыхания [6] и использованием повышенного коэффициента осаждения для крупнодисперсной пыли (АМАД 5 мкм) [7]. Сравнение с данными мониторинга (Бондарь Ю.И. [8]) подтверждает соответствие модели, где объемная активность отклоняется лишь на 15-20% от реальных полесских значений, обеспечивая необходимый консерватизм расчетов согласно принципу ALARA [3]. Разбежка между нашими данными и данными Бондаря Ю. И. (2018) объясняется мозаичностью загрязнения почвенного покрова ППРЭЗ и метеоусловиями (влажность почвы) в моменты замеров. Подробный разбор отклонений, включая влияние частоты сердечных сокращений на легочную вентиляцию и обоснование высокого коэффициента осаждения, подтверждает корректность использования разработанной методики для условий ЧАЭС.

Таким образом, предлагаемая модель позволяет трансформировать доступные показатели пульсометрии в инструмент точного дозиметрического контроля, выявляя скрытые риски внутреннего облучения, которые не учитываются при традиционных методах оценки. Это делает ее эффективным элементом системы обеспечения радиационной безопасности персонала, работающего в условиях радиоактивного загрязнения территорий заповедника.

#### Список литературы

1. Публикация 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ): пер. с англ. / под ред. М. Ф. Киселева, Н. К. Шандалы. – М.: Изд-во ООО «ПКФ «Алана», 2009. – 312 с.
2. Публикация 89 МКРЗ. Основные физиологические параметры человека для радиационной защиты: справочные значения: пер. с англ. / под ред. М. А. Мохини. – М.: Изд-во «Медкнига», 2007. – 192 с.
3. Физиология человека: учебник / под ред. В. М. Покровского, Г. Ф. Коротько. – 3-е изд. – М.: Медицина, 2011. – 664 с. (Раздел: Дыхание и энергетический обмен).
4. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 100 с.
5. Гланц, С. Медико-биологическая статистика / С. Гланц; пер. с англ. Ю. А. Данилова. – М.: Практика, 1998. – 459 с.
6. Екидин, А. А. Оценка внутреннего облучения персонала при проведении лесохозяйственных работ на радиоактивно загрязненных территориях / А. А. Екидин [и др.] // Радиационная гигиена. – 2020. – Т. 13, № 2. – С. 34–42.
7. Публикация 130 МКРЗ. Осаждение аэрозолей в дыхательной системе человека: новые параметры модели: пер. с англ. – М.: Изд-во АНРИ, 2017. – 156 с.
8. Бондарь, Ю. И. Радиоэкологические аспекты состояния приземного слоя атмосферы на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника / Ю. И. Бондарь [и др.] // Радиация и риск. – 2018. – Т. 27, № 2. – С. 101–111.