



МРНТИ 29.15.01

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-150-1-186-203>

Применение трековых детекторов для измерения активности радона и торона в окружающей среде: обзор методов и результатов

Ж.О. Насилов¹, К.Ш. Жумадилов*¹, Ж.А. Байгазинов², Н. Нурсултанова¹,
А.И. Иванников³, В.Ф. Степаненко³, М. Хоши⁴, А.М.Андабаева¹

¹Международная кафедра ядерной физики, новых материалов и технологий, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

²АО «Парк ядерных технологий», Курчатов, Казахстан

³МРНЦ имени А.Ф. Цыба – филиала ФГБУ «НМИЦ радиологии», Обнинск, Россия

⁴Университет Хиросима, Хиросима, Япония

*Автор для корреспонденции: zhumadilovk@gmail.com

Аннотация. В данной статье представлен обзор применения трековых детекторов для измерения активности радона и торона в различных средах. Исследование охватывает ключевые аспекты метода: принципы работы, типы детекторов (CR-39, LR-115, Radon Eye Plus2, SSNTD), условия экспозиции и методы анализа. Рассмотрены современные исследования, включающие замеры активности радона в жилых помещениях, шахтах, пещерах, воде и почве, а также влияние различных геологических и климатических факторов на измерения. Показано, что CR-39 обладает высокой чувствительностью к низким концентрациям радона, что делает его предпочтительным для детальных исследований малых уровней загрязнения, тогда как LR-115 более эффективен для долгосрочного мониторинга благодаря его устойчивости к внешним воздействиям. Особое внимание уделено влиянию параметров окружающей среды (температуры, влажности, давления) и методам калибровки на точность результатов. Рассмотрены актуальные проблемы, связанные с интерпретацией данных, в том числе погрешности, обусловленные методами травления треков и визуализации результатов. Подчеркивается необходимость стандартизации методик измерения и перспективы автоматизации процессов анализа с использованием цифровых технологий. Результаты работы могут быть использованы при разработке стратегий радиационной безопасности, контроле уровня радона в жилых и промышленных зонах, а также в экологическом мониторинге. Предложены рекомендации по оптимальному применению трековых детекторов для оценки радиационных рисков и разработке более эффективных методов детектирования радона в различных средах.

Ключевые слова: Радон, трековые детекторы, CR-39, LR-115, RadonEye Plus2, SSNTD, калибровка детекторов

Поступила 7.02.2025. После доработки 24.02.2025. Принята к печати 25.02.2025. Доступно онлайн 25.03.2025

¹ *автор для корреспонденции

1. Введение

Радон – считается как радиоактивный газ, который не взаимодействует с другими элементами на химическом уровне. Однако его присутствие способно влиять на физические характеристики окружающей среды. Радон (^{222}Rn) этот газ является продуктом распада урана (^{238}U) а его наиболее значимый изотоп обладает периодом полураспада 3,825 дня. Благодаря этому радон успевает перемещаться на значительные расстояния и накапливаться в замкнутых пространствах, таких как помещения. Радон (^{222}Rn) и его короткоживущие продукты распада (^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi и ^{214}Po) в жилых помещениях радон считается главным источником облучения населения, связанного с естественной радиоактивностью, обеспечивая почти 50% средней глобальной эффективной дозы радиационного воздействия [1]. Интерес к изучению радона связан прежде всего с его способностью накапливаться в помещениях и оказывать вредное воздействие на организм человека. При вдыхании этот газ и его радиоактивные дочерние продукты могут серьезно повредить дыхательную и пищеварительную системы. Наибольшему риску подвергаются органы дыхания, поскольку радиоактивные частицы оседают в легких, увеличивая вероятность заболеваний. Именно поэтому радон считается вторым после курения фактором риска развития рака легких [2]. Концентрация радона определяется множеством факторов, среди которых содержание радия в грунте, метеорологические условия, а также интенсивность его выделения из различных типов почв и горных пород [3, 4].

Уровень концентрации радона в почве определяется содержанием радий, а также интенсивностью излучения, исходящего от почв и горных пород [5]. Среди множества факторов, влияющих на выделение радона, ключевую роль играет содержание радия в почве или коренной породе. Однако уровень воздействия радона значительно различается в зависимости от местоположения, главным образом из-за различий в скорости его высвобождения из грунта. Исследования этой скорости имеют большое значение, поскольку они помогают определить вклад различных материалов в общую концентрацию радона, фиксируемую внутри жилых помещений [6-7]. Радон и его дочерние продукты могут высвобождаться из строительных материалов, которые являются одним из источников его поступления в жилые помещения. Изучение скорости выделения радона из различных строительных материалов играет важную роль в оценке их вклада в общую концентрацию этого газа внутри зданий. Исследования показали, что со временем интенсивность выделения радона снижается, что связано с возрастом постройки [8-9].

Высокая концентрация радона в воздухе жилых и рабочих помещений представляет серьезную опасность для здоровья человека. При вдыхании радон и продукты его распада оседают в легких, облучая ткани и повышая риск развития рака легких. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), радон является второй по значимости причиной рака легких после курения.

Цель данной обзорной статьи – проанализировать применение трековых детекторов для оценки активности радона в различных средах, сравнить результаты разных

исследований, выявить факторы, влияющие на точность измерений, и оценить перспективы развития этого метода.

За последние годы было разработано множество методов для обнаружения и количественного анализа радона и его дочерних продуктов. Однако универсального метода, подходящего для всех типов измерений, не существует. Оптимальный выбор зависит от целей исследования, требуемой информации и доступного оборудования. Например, для оценки воздействия радона на население необходимы длительные комплексные измерения в больших масштабах, тогда как изучение его концентрации в почве в зависимости от экологических и геофизических факторов требует непрерывного мониторинга.

Трековые детекторы – это пассивные детекторы, которые регистрируют альфа-частицы, испускаемые радоном и его дочерними продуктами распада (полоний-218 и полоний-214). Альфа-частицы оставляют микроскопические треки (следы) в специальном материале детектора. После экспозиции детектор обрабатывается химическим способом, и треки становятся видимыми под микроскопом. Плотность треков пропорциональна концентрации радона в воздухе.

2. Материалы и методы

В последние годы было создано множество методов для выявления и количественного анализа радона и его дочерних продуктов. Однако универсального подхода, способного удовлетворить всем требованиям различных видов измерений, не существует. Выбор наиболее подходящего метода зависит от конкретной необходимой информации, типа радоновых исследований и стоимости аппаратуры. Например, для измерения воздействия радона на население необходимо большое количество долгосрочных комплексных измерений, в то же время исследование зависимости концентрации радона в почве от экологических и геофизических факторов требует его непрерывного мониторинга.

Краткосрочные измерения радона

Краткосрочные измерения, продолжающиеся от нескольких дней до одного месяца, особенно эффективны для скрининговых исследований, направленных на выявление домов с повышенным уровнем радона, а также для анализа географических вариаций его концентрации. Когда такие краткосрочные измерения используются для оценки воздействия радона в жилищах, необходимо особое внимание при определении протокола воздействия. Для этой цели наиболее привлекательными методами являются активированные угли, электретные ионные камеры (EIC) и твердотельные ядерные трековые детекторы (SSNTD). Предпринимались различные попытки повысить эффективность устройств с активированным углем, в частности путем использования диффузионного барьера для снижения влияния влажности. Что касается электретных ионных камер (EIC), их основным ограничением является высокая чувствительность к гамма-излучению, которую, однако, можно легко исправить любыми средствами, включая дополнительную электретную ионную камеру, защищенную от радона.

SSNTD не обладают эффективной чувствительностью для краткосрочных измерений. Это ограничение в основном связано с небольшой обычно учитываемой площадью. Другой альфа-трековый детектор, не чувствительный к выходу пластины, изготовлен из поликарбонат может эффективно использоваться в качестве открытого детектора, обеспечивая удобство в применении.

Долгосрочное измерение радона

Наиболее достоверные данные о воздействии радона в различных средах обеспечивают долгосрочные интегрирующие измерения, проводимые в течение периода до одного года. Чаще всего для этих целей применяются детекторы SSNTD и электретные детекторы, которые могут использоваться как в открытом виде, так и в сочетании с закрытыми пробоотборниками радона.

Наиболее распространенной конфигурацией закрытого пробоотборника является камера с пористым фильтром, таким как стекловолокно, водоотталкивающая ткань или микропористый бумажный фильтр, а также одним или несколькими SSNTD. Эти фильтры предназначены для задержки внешних дочерних продуктов радона, однако они не позволяют различать газ торон и водяной пар.

Пассивное и активное измерение

Пассивные методы измерения радона и его дочерних продуктов основаны на регистрации радиоактивного распада этих веществ..

Существует несколько подходов к классификации систем измерения радона, разделяющих их на активные и пассивные типы. Ниже представлена классификация, позволяющая избежать возможной путаницы:

1. Активные методы и приборы

Отбор проб радона и его дочерних продуктов в активных методах осуществляется принудительно с применением источника питания, например насосов.

2. Пассивные приборы и методы. Отбор проб радона и его дочерних продуктов осуществляется за счет естественной диффузии, без использования источников питания.

Дополнительно системы измерения могут классифицироваться по типу применяемого детектора излучения.

– Детекторы с откликом в реальном времени – устройства, обеспечивающие мгновенный анализ концентрации радона, чаще всего основаны на использовании сцинтилляционных материалов или полупроводниковых сенсоров.

– Детекторы без отклика в реальном времени – устройства, накапливающие информацию о концентрации радона в течение определенного времени, такие как трековые детекторы, детекторы на основе активированного угля и электретные детекторы.

На практике мониторинг радона и его дочерних продуктов может осуществляться с использованием различных комбинаций активных или пассивных систем отбора проб, а также детекторов с откликом в реальном времени или без него.

Способы измерения концентрации радона

Существуют различные методы измерения концентрации радона, применяемые в разных сферах. Уровень радона в воздухе во многом определяется рядом факторов,

главным образом вентиляцией. Для его измерения используются различные детекторы, которые могут быть помещены в скважину. Среди них – твердотельные ядерные трековые детекторы, а также дочерние коллекторы, такие как альфа-карта. Кроме того, применяются электретные детекторы, термолюминесцентные люминофоры, а также твердотельные электронные детекторы, включая фотодиоды и газопоглотители.

В исследованиях, включенных в наш анализ, использовались несколько основных типа трековых детекторов.

Для получения достоверных результатов важно соблюдать определенные условия экспозиции детекторов.

Время экспозиции: обычно составляет от нескольких недель до нескольких месяцев, в зависимости от ожидаемой концентрации радона.

Температура: трековые детекторы чувствительны к температуре, поэтому важно учитывать температурные условия в помещении, где проводятся измерения.

Влажность: высокая влажность может повлиять на чувствительность детекторов, поэтому в некоторых случаях используются специальные защитные корпуса.

Для перевода плотности треков в единицы активности радона ($\text{Бк}/\text{м}^3$) необходима калибровка детекторов. Калибровка проводится в специальных радоновых камерах с известной концентрацией радона.

Полностью пассивные устройства могут эффективно использоваться для измерения только радона. В этих устройствах радон проникает через фильтр или мембрану в корпус детектора, где его излучение регистрируется непосредственно пассивными детекторами, фиксирующими дочерние продукты распада радона.

Для измерения радона могут применяться различные типы пассивных детекторов, включая термолюминесцентные материалы, электретные устройства и твердотельные ядерные трековые детекторы (SSNTD). В рамках крупномасштабных исследований SSNTD обладают наилучшими характеристиками для мониторинга радона и широко используются в практике. Наиболее распространённые трековые детекторы, применяемые для регистрации альфа-частиц, включают нитрат целлюлозы (чаще всего красный LR-115), поликарбонатные материалы (Makrofol или Lexan), а также CR-39. Метод детектирования с использованием CR-39 основан на диффузии воздуха в держатель, где альфа-частицы фиксируются твердотельным ядерным трековым детектором [10].

Метод травления треков

Метод травления треков вполне подходит для обнаружения радона в почвенном газе из-за его незначительного фона ложных сигналов, низкой стоимости, прочности и природы как интегрирующего измерения. Детекторная сборка находится в вертикальном положении около дна отверстия бура, и альфа-частицы распада радона попадают на пленки детектора, оставляя их испытания на радиационное повреждение. Пленки LR-115 могут извлекаться через неделю или месяц, в зависимости от условий эксперимента. Затем они подвергаются травлению в растворе 2,5 N NaOH при постоянной температуре 98 °C в течение 2 часов. В результате на плёнке формируются альфа-треки, которые проявляются в виде круглых или конических пятен. При длительном травлении эти следы превращаются в сквозные отверстия.

Пятна или отверстия треков будут подсчитаны с помощью бинокулярного микроскопа – Подсчет треков: Метод подсчета треков (вручную или с помощью автоматизированных систем) также может влиять на результаты.

Калибровка детекторов:

– Радоновые камеры: Калибровка детекторов проводится в радоновых камерах с известной концентрацией радона. Точность калибровки может влиять на точность измерений.

3. Результаты и обсуждение

В обзор включены исследования, посвященные измерению активности радона в различных условиях, выполненные с использованием разнообразных типов детекторов. Основной целью было сопоставление диапазонов активности радона, зарегистрированных в жилых помещениях, лабораторных условиях, а также в специфических средах, таких как пещеры или почвенный газ. Полученные данные демонстрируют значительную вариативность концентраций радона, что подчёркивает важность выбора подходящего метода мониторинга.

CR-39 является одним из наиболее распространённых типов пассивных детекторов, применяемых для долгосрочного мониторинга радона. Этот детектор используется в условиях с изменяющимися уровнями радона, включая жилые помещения, калибровочные камеры и пещеры. Например, в исследовании Jabbar H.J. и др. концентрация радона составила 269,51 Бк/м³ в калибровочной камере, тогда как в жилых домах Великобритании [11], по данным Kouroukla E. и др. средняя активность составила 20 Бк/м³ [12]. Исследование Mohammadmad A. и др. проведённое в 78 домах Мешхеда (Иран), выявило диапазон концентраций от 50 до 376 Бк/м³, что значительно превышает мировые стандарты [13]. В специфических условиях, таких как пещеры, концентрация радона может достигать 1489 Бк/м³, как это показано в исследовании Panlaqui A. и др. на Филиппинах [14].

Детекторы RADUET, которые основаны на технологии CR-39, применяются для одновременного мониторинга радона (²²²Rn) и торона (²²⁰Rn). Исследования Atangana V. и др. показали, что средняя активность радона в жилых домах составляла 32 Бк/м³ (диапазон от 19 до 62 Бк/м³) [15]. В многоквартирных домах Дакки (Бангладеш) уровень радона варьировался от 3 до 20 Бк/м³, что демонстрирует низкие значения, безопасные для здоровья [16]. В то же время, исследование F. Omonya Wanjala в глиняных домах деревни Ортом (Кения) выявило более высокую активность – до 72 Бк/м³ [17]. RADUET также использовался для изучения концентраций в Мешхеде, где зарегистрированы значения от 50 до 376 Бк/м³ [18].

RadonEye, активный детектор для краткосрочного мониторинга, показал высокую точность в лабораторных условиях. Например, в радоновой камере Великобритании, по данным I. Dimitrova. И др. концентрация варьировалась от 400 до 1800 Бк/м³ [19]. Это демонстрирует надёжность устройства при измерениях в условиях высоких уровней радона. В исследовании Pam W. и др. в Канаде бытовые детекторы, включая RadonEye,

использовались для оценки точности при концентрации 200 Бк/м³ [20]. Результаты показали, что бытовые устройства менее точны по сравнению с профессиональными, но остаются полезными для общего мониторинга.

LR-115, чувствительный пассивный детектор, используется для оценки радона в жилых домах и при сезонных вариациях. В деревне Буддонитанда (Индия) исследование G. Suman. и др. выявило среднюю активность радона 94 Бк/м³, причём максимальные значения достигали 675 Бк/м³ зимой [21]. Аяу К. и др. изучали 146 домов в Удхампуре (Индия), где средняя активность составила 29 ± 9 Бк/м³. Это исследование подчеркнуло связь концентраций радона с вентиляцией и геологическими условиями [22].

Электростатические детекторы также находят применение для массового мониторинга благодаря своей простоте и надёжности. Jon Miles в своих исследованиях показал, что активность радона в жилых помещениях варьировалась от 5 до 65 Бк/м³ [23]. Эти устройства эффективно исключают влияние радона-220, что делает их пригодными для длительного использования.

Другие профессиональные детекторы, такие как Radtrak2, Duotrak и RD200M, также использовались для изучения активности радона. В исследованиях Joan F.R. и др. в условиях мобильной камеры с уранинитом активность достигала 3000 Бк/м³ [24]. Diego V. и др. применяли RD200M для прогнозирования концентрации радона в жилых домах, где было зарегистрировано значение 369 Бк/м³ [25]. Применение машинного обучения в таких исследованиях открывает перспективы для улучшения методов мониторинга.

Рисунок 1. Сравнение активности радона в разных исследованиях

Диапазоны активности радона, зарегистрированные в различных исследованиях, демонстрируют значительную вариативность:

- Минимальная зарегистрированная активность составила 3 Бк/м³ в жилых домах Дакки (Бангладеш) при использовании детектора RADUET.
- Максимальная активность достигла 3000 Бк/м³ в экспериментах с использованием профессиональных датчиков, таких как Radtrak2, в радоновой камере.

Таблица 1. Сравнение по чувствительности и диапазону измерений

Тип детектора	Чувствительность к радону	Чувствительность к торону	Диапазон измерений (Бк/м ³)	Примечания
CR-39	Средняя	Высокая	0,00434–1000	Долговременные исследования
RadonEye Plus2	Высокая	Низкая	50–1800	Точные результаты в реальном времени
Safety Siren Pro	Средняя	Низкая	До 200	Для бытового использования

Airthings Wave	Средняя	Средняя	200–1000	Чувствителен к изменениям влажности
RADUET	Средняя	Средняя	50–394	Подходит для долгосрочного анализа

Сравнительный анализ детекторов радона показывает, что RadonEye Plus2 обладает наибольшей чувствительностью и широким диапазоном измерений (50-1800 Бк/м³), что делает его оптимальным для точного мониторинга в реальном времени. В свою очередь, CR-39 демонстрирует высокую чувствительность к торону и способен фиксировать сверхнизкие концентрации радона (до 0,00434 Бк/м³), что делает его наиболее подходящим для долгосрочных исследований.

RADUET имеет сбалансированную чувствительность как к радону, так и к торону, а его диапазон измерений (50-394 Бк/м³) позволяет эффективно использовать его в долгосрочных исследованиях. Airthings Wave и Safety Siren Pro являются детекторами средней чувствительности, ориентированными на бытовое использование, но Airthings Wave чувствителен к изменениям влажности, что может повлиять на точность измерений.

В целом, выбор детектора зависит от целей исследования:

Для научных исследований и точных измерений в реальном времени лучше подходит RadonEye Plus2.

Для долговременного мониторинга радона и торона в различных условиях оптимален CR-39.

RADUET – универсальный вариант для изучения как радона, так и торона в среднем диапазоне концентраций.

Бытовые детекторы (Airthings Wave и Safety Siren Pro) подходят для повседневного мониторинга, но их точность ниже по сравнению с профессиональными устройствами.

Таблица 2. Сравнение по эксплуатационным характеристикам

Критерий	Трековые детекторы (CR-39, LR-115)	Электронные детекторы (RadonEye)	Бытовые датчики (Airthings)
Стоимость	Низкая	Средняя	Средняя/высокая
Точность	Средняя	Высокая	Средняя
Потребность в питании	Не требуется	Требуется	Требуется
Временная динамика	Низкая	Высокая	Средняя
Простота в использовании	Средняя	Высокая	Очень высокая

Различные типы детекторов радона обладают своими преимуществами и ограничениями в зависимости от условий эксплуатации и целей использования.

Трековые детекторы (CR-39, LR-115) обладают низкой стоимостью и не требуют питания, что делает их удобными для долговременного мониторинга. Однако они

имеют среднюю точность и низкую временную динамику, так как результаты требуют обработки после длительного периода экспозиции.

Электронные детекторы (RadonEye) обеспечивают высокую точность и быструю реакцию на изменения концентрации радона, что делает их оптимальными для краткосрочных измерений и оперативного контроля. Однако они требуют постоянного питания и имеют более высокую стоимость по сравнению с трековыми детекторами.

Бытовые датчики (Airthings) отличаются максимальной простотой в использовании и подходят для непрерывного мониторинга радона в домашних условиях. Они не требуют специальной подготовки для работы, но обладают средней точностью и чувствительностью к внешним факторам, таким как температура и влажность. Их стоимость может варьироваться от средней до высокой в зависимости от модели и функциональности.

Таблица 3. Влияние внешних условий на работу детекторов

Тип детектора	Влияние влажности	Влияние температуры	Требования к калибровке	Защищенность от загрязнений
CR-39	Умеренное	Незначительное	Не требуется	Умеренная
RadonEye Plus2	Низкое	Незначительное	Требуется	Высокая
Airthings Wave	Высокое	Умеренное	Минимальное	Низкая
RADUET	Умеренное	Незначительное	Требуется	Средняя

Трековые детекторы (CR-39, RADUET) устойчивы к изменениям внешних условий, но требуют защиты от загрязнений.

RadonEye Plus2 наиболее стабилен при изменении окружающей среды, но нуждается в регулярной калибровке.

Airthings Wave удобен в использовании, но его точность может снижаться при высокой влажности и загрязнении воздуха.

Как было показано в предыдущем разделе, результаты измерений активности радона с помощью трековых детекторов могут варьироваться в зависимости от ряда факторов, таких как тип детектора, условия экспозиции, методы анализа и калибровка детекторов.

– CR-39 и LR-115: Наши результаты показывают, что средняя активность радона, измеренная с помощью CR-39, значительно ниже, чем измеренная с помощью LR-115. Это может быть связано с тем, что CR-39 обладает большей чувствительностью к радону, чем LR-115.

– Другие типы детекторов: В некоторых исследованиях использовались другие типы трековых детекторов, которые также могут иметь различную чувствительность к радону.

Время экспозиции: Чем дольше время экспозиции, тем больше треков образуется на детекторе и тем выше измеренная активность радона.

Температура и влажность: Температура и влажность могут влиять на чувствительность трековых детекторов. Например, высокая влажность может привести к снижению чувствительности.

Место проведения измерений: Концентрация радона в воздухе может варьироваться в зависимости от места проведения измерений (жилые помещения, шахты, пещеры).

Преимущества и недостатки трековых детекторов

Преимущества:

– Простота использования: Трековые детекторы не требуют специальных навыков или оборудования для проведения измерений.

– Компактность и портативность: Трековые детекторы небольшие и легкие, что позволяет использовать их в труднодоступных местах.

– Низкая стоимость: Трековые детекторы являются относительно недорогим методом измерения радона.

– Долгосрочный мониторинг: Трековые детекторы могут быть экспонированы в течение длительного времени, что позволяет проводить долгосрочный мониторинг радона.

Недостатки:

– Чувствительность к условиям окружающей среды: На результаты измерений могут влиять температура, влажность и другие факторы окружающей среды.

– Необходимость химической обработки: Трековые детекторы требуют химической обработки (травления) для проявления треков.

– Ограниченная точность: Точность измерений с помощью трековых детекторов может быть ниже, чем у некоторых других методов.

4. Выводы

В данной обзорной статье мы проанализировали применение трековых детекторов для оценки активности радона в различных средах. Были рассмотрены различные типы детекторов, условия экспозиции, методы анализа и факторы, влияющие на точность измерений.

Результаты анализа показывают, что выбор детектора определяется задачами исследования и условиями измерений. CR-39 и RADUET наиболее эффективны для долгосрочного мониторинга радона в диапазоне 10–10 000 Бк/м³ с чувствительностью 0,5-1 трек/см² на 100 Бк·ч/м³ и применяются для долгосрочного мониторинга, тогда как RadonEye предпочтителен для лабораторных измерений, так как имеет быстрый отклик (10-30 мин) и высокую чувствительность от 10 Бк/м³. Его точность составляет ±10% при концентрации выше 50 Бк/м³, что делает его удобным для оперативного мониторинга. LR-115 оказался полезным для изучения сезонных вариаций радона и торона, особенно в регионах с высоким риском облучения. Его чувствительность составляет 1–2 трека/см² на 100 Бк·ч/м³, а диапазон измерений – от 40 до 5000 Бк/м³. Электростатические детекторы остаются простым и надёжным инструментом для широкомасштабных исследований в жилых помещениях. Они позволяют измерять концентрацию радона в диапазоне 30-

3000 Бк/м³ с точностью $\pm 15\%$ и не требуют сложной обработки данных. Такой подход к выбору детекторов позволяет получить более точные данные о концентрации радона, что крайне важно для оценки экологических рисков и разработки стратегий по снижению воздействия радона на здоровье населения.

– Трековые детекторы являются эффективным и доступным методом измерения активности радона.

– Чувствительность детекторов, условия экспозиции, методы анализа и калибровка могут влиять на результаты измерений.

– CR-39 и LR-115 являются наиболее распространенными типами трековых детекторов, причем CR-39 обычно обладает большей чувствительностью к радону.

– Трековые детекторы могут быть использованы для долгосрочного мониторинга радона в жилых помещениях, на рабочих местах, в почве и воде.

Перспективы развития метода:

– Повышение точности: Совершенствование методов анализа и разработка новых материалов для трековых детекторов могут привести к повышению точности измерений.

– Автоматизация: Автоматизация процесса анализа трековых детекторов может упростить и ускорить процесс измерения радона.

– Миниатюризация: Создание миниатюрных трековых детекторов может расширить область их применения, например, для индивидуального мониторинга.

– Новые материалы: Исследование новых материалов для трековых детекторов может привести к созданию более чувствительных и эффективных детекторов.

В целом, трековые детекторы являются перспективным методом измерения радона, который имеет большой потенциал для дальнейшего развития.

Вклад авторов

Ж.О. Насилов: написание текста и утверждение окончательного варианта статьи для публикации.

К.Ш. Жумадилов: написание текста и критический анализ его содержания.

Ж.А. Байгазинов: написание – рецензирование и редактирование.

Н. Нурсултанова, А.М. Андабаев – написание текста и его содержание критический обзор.

В.Ф. Степаненко, А.И. Иванников, М. Хоши: написание текста и критика его содержания.

Благодарности

Данная работа выполнена при финансовой поддержке по проекту Грантового финансирования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН AP19678341, договор № 269/23-25 от 03.08.2023), а также в рамках программно-целевого финансирования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН BR27101493, решение ННС протокол заседания №8 от 06.12.2024).

Список литературы

1. НКДАР ООН, Научный комитет ООН по действию атомной радиации, Источники и действие ионизирующего излучения, Том I Приложение А: Методологии оценки доз, Организация Объединенных Наций, Нью-Йорк, 2000 – **отчет**
2. МКРЗ, Международная комиссия по радиологической защите от радона-222 дома и на работе, Отчет МКРЗ 65, Пергамон, Оксфорд, 1993 – **отчет**
3. Х. Идрисс, И. Салих, А.С. Абдулазиз, М.Ю. Абдельгалил, С.А. Салих, А.М. Хасан, М.А. Эл.Тахир, М.М.О. Ахамед, Исследование радона в почвенном газе, микроэлементов и климатических параметров вокруг штата Южный Кордофан, Судан, Науки об окружающей среде Земли, 2014;72(2):335-339 – **журнал**
4. В.В. Назарофф, А.В. Неро-младший, Радон и продукты его распада в воздухе помещений, John Wiley and Sons, Нью-Йорк, 1988 - **книга**
5. Г. Акерблом, К. Вильсон, Радон-геологические аспекты экологической проблемы. Отчет № 30, Геологическая служба Швеции, Уппсала, 1982 – **отчет**
6. А.Е.А. Elzain, Определение концентрации радия и скорости выделения радона в образцах почвы с использованием CR-39, Достижения в прикладных научных исследованиях, 2015;6(2):92-102 – **журнал**
7. А.Е.А. Elzain, Y.Sh. Mohammed, Kh.Sh. Mohamed, A.M. Mohamed-Ali, Исследование концентрации радия и скорости выделения радона в образцах почвы из города Кассала, Судан, с использованием SSNTD, Американский журнал физики и приложений, 2016;4(4):84-89 – **журнал**
8. Ф. Абу-Джарад, Применение детектора ядерного трекового травления для измерений, связанных с радоном, Международный журнал по применению радиации и приборостроению, часть D, Ядерные треки и радиационные измерения, 1988;15(1):525-534 – **журнал**
9. К.Н. Ю, Т.Ф. Чан, Э.М. Янг, Изменение скорости выделения радона с поверхностей зданий разного возраста, Health Physics, 1995;68(5):716-718 – **журнал**
10. М. Беоццо и др., Измерение уровня радона в помещениях в районе Болоньи, Труды 15-й Международной конференции по трекам частиц в твердых телах, Марбург, Германия, 1990. стр. 29 – **материалы конференций**
11. Х. Джебур Джаббар, Р.Х. Абдул Суббер, Туама Саадон Веджуд, Калибровка CR-39 для различных высот дозиметров радона и применение концентрации радона в отложениях реки Махаджран в мухафазе Басра, Ирак, Журнал физики: Серия конференций, 2019 – **журнал**
12. E. Kouroukla1, T.D. Gooding, H.S. Fonseca, Анализ методов снижения уровня радона: 10-летний обзор, Журнал радиологической защиты, 2024. стр. 44 – **журнал**
13. Мохаммадемад Аделиха, Амин Шахрохи, Мортеза Имани, Станислав Халупник, Тибор Ковач, Радиологическая оценка концентрации радона и торона в помещениях и карта радона в жилых помещениях в Мешхеде, Иран, Int. J. Environ. Res. Public Health, 2021. 18, 141 – **журнал**
14. А. Панлаки, Ф. Баллестерос, Уровни радона в пещерах острова Бохол, Филиппины, 18-я Международная конференция по экологической науке и технологиям, 2023 – **материалы конференций**
15. Atangana Bingana, Martin Serge, Takoukam Soh, Serge Didier, Bineng Guillaume Samuel, Chutima Kranrod, Yasutaka Omori, Masahiro Hosoda, Saïdou, Shinji Tokonami, Assessment of Radiological Risks due to Indoor Radon, Thoron and Progeny, and Soil Gas Radon in Thorium-Bearing Areas of the Centre and South Regions of Cameroon, Atmosphere 2023. 1708 – **журнал на англ. языке**
16. Доктор Махамудул Хасан, Мирослав Джаник, Шиха Первин, Такеши Иимото, Предварительное воздействие радона и торона на население в Дакке, Бангладеш, Атмосфера 2023, 14, 1067 – **журнал**

17. F. Omonya Wanjala, N.O. Hashim, D. Otswana, J. Kebwaro, M. Chege, C. Nyambura, Atieno Carmen, *Lung Cancer Risk Assessment due to Radon and Thoron Exposure in Dwellings in Ortum, Kenya*, Journal of Environment Pollution and Human Health, 2021, Vol. 9, No. 2, 64-70 – **журнал на англ.языке**

18. I. Dimitrova, J.M. Wasikiewicz, V. Todorov, S. Georgiev, Z. Daraktchieva, C.B. Howarth, D.A. Wright, B. Sabot, K. Mitev, *Coherent long-term average indoor radon concentration estimates obtained by electronic and solid state nuclear track detectors*, Radiation Physics and Chemistry 226 (2025) 112212 – **журнал на англ.языке**

19. Пэм Варкентин, Эрин Карри, Огенекоме Майкл, Брайан Бьорндал, *Сравнение электронных радоновых мониторов потребительского класса*, Журнал радиологической защиты. 2020. 1258–1272 (15 стр.) – **журнал**

20. G. Suman, K.Vinay Kumar Reddy, M. Sreenath Reddy, Ch.Gopal Reddy, P.Yadagiri Reddy, *Radon and thoron levels in the dwellings of Buddonithanda: a village in the environs of proposed uranium mining site, Nalgonda district, Telangana state, India*, Scientific Reports, (2021) 11:6199 – **журнал на англ.языке**

21. Аджай Кумара, Сумит Шармаа, Рохит Мехраб, Саурабх Наранг, Розалин Мишрад, *Оценка концентраций радона и торона в помещениях и их связь с сезонными колебаниями и геологией района Удхампур, Джамму и Кашмир, Индия*, Международный журнал охраны труда и окружающей среды. 2017 – **журнал**

22. Джон Майлз, *Методы измерения радона и приборы*, Национальный совет по радиологической защите, Чилтон, Дидкот, Оксфордшир - **книга**

23. Джоан Ф. Рей, Николя Мейссер, Душан Лицина, Жоэль Гойет Перно, *Оценка эффективности активных датчиков радона и пассивных дозиметров при низких и высоких концентрациях радона*, Строительство и окружающая среда 250. 2024 – **журнал**

24. Диего Валькарсе, Альберто Альвареллос, Хуан Рамон Рабуньяль, Хулиан Дорадо, Маркос Гестал, *Система мониторинга радона на основе машинного обучения*, Хемосенсоры 2022, 10, 239 – **журнал**

**Ж.О. Насилов¹, К.Ш. Жумадилов^{*1}, Ж.А. Байгазинов², Н. Нурсултанова¹, А.И. Иванников²,
В.Ф. Степаненко³, М. Хоши⁴, А.М. Андабаева¹**

¹Халықаралық ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар халықаралық кафедрасы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан,

²«Ядролық технологиялар паркі» АҚ, Курчатова, Қазақстан

³Ресей Федерациясының Денсаулық сақтау Министрлігінің «ФМЗО» Федералдық Мемлекеттік бюджеттік мекемесінің филиалы А.Ф. Цыб атындағы МРФО, Обнинск, Ресей

⁴Хиросима университеті, Хиросима, Жапония

*Хат алмасуға арналған автор: zhumadilovk@gmail.com

Радон мен торон белсенділігін өлшеуге арналған трек детекторларын қолдану: әдістер мен нәтижелерге шолу

Аңдатпа. Бұл мақалада әртүрлі орталарда радон мен торон белсенділігін өлшеуге арналған трек детекторларының қолданылуына шолу жасалады. Зерттеу әдістің негізгі аспектілерін

қамтиды: жұмыс принциптері, детектор түрлері (CR-39, LR-115, Radon Eye Plus2, SSNTD), әсер ету жағдайлары және талдау әдістері. Тұрғын үй-жайлардағы, шахталардағы, үңгірлердегі, судағы және топырақтағы радон белсенділігін өлшеуді, сондай-ақ өлшеулерге әртүрлі геологиялық және климаттық факторлардың әсерін қамтитын заманауи зерттеулер қарастырылады. CR-39 төмен радон концентрацияларына жоғары сезімталдығы бар екені көрсетілді, бұл ластану деңгейінің төмендігін егжей-тегжейлі зерттеу үшін артықшылық береді, ал LR-115 сыртқы әсерлерге беріктігіне байланысты ұзақ мерзімді бақылау үшін тиімдірек. Нәтижелердің дәлдігіне қоршаған орта параметрлерінің (температура, ылғалдылық, қысым) және калибрлеу әдістерінің әсеріне ерекше назар аударылады. Деректерді интерпретациялаумен байланысты ағымдағы мәселелер, соның ішінде жолды өңдеу әдістерінен туындаған қателер және нәтижелерді визуализациялау қарастырылады. Өлшеу әдістерін стандарттау қажеттілігі және цифрлық технологияларды пайдалана отырып талдау процестерін автоматтандыру перспективалары атап өтілді. Жұмыстың нәтижелері радиациялық қауіпсіздік стратегиясын әзірлеуде, тұрғын және өндірістік аудандарда радон деңгейін бақылауда, сондай-ақ қоршаған ортаны бақылауда пайдаланылуы мүмкін. Радиациялық қауіптерді бағалау үшін жол детекторларын оңтайлы пайдалану және әртүрлі орталарда радонды анықтаудың тиімді әдістерін әзірлеу бойынша ұсыныстар ұсынылады.

Түйін сөздер. Радон, трек детекторлары, CR-39, RADUET, LR-115, RadonEye Plus2, SSNTD детекторын калибрлеу.

Zh.O. Nassilov¹, K.Sh. Zhumadilov*¹, Zh.A. Baigazinov²,

N. Nursultanova¹, A.I. Ivannikov³, V.F. Stepanenko³, M. Hoshi⁴, A.M. Andabayeva¹

¹*International Department of Nuclear Physics, New Materials and Technology, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

²*«Park of Nuclear Technologies» JSC, Kurchatov, Kazakhstan*

³*A.F. Tsyb Medical Radiological Research Center, Obninsk, Russia*

⁴*Hiroshima University, Hiroshima, Japan*

**Correspondence: zhumadilovk@gmail.com*

Application of track detectors to measure radon and thoron activity in the environment: a review of methods and results

Abstract. This paper presents an overview of the application of track detectors for measuring radon and thoron activity in various environments. The study covers the key aspects of the method: operating principles, detector types (CR-39, LR-115, Radon Eye Plus2, SSNTD), exposure conditions and analysis methods. Modern studies, including measurements of radon activity in residential premises, mines, caves, water and soil, as well as the influence of various geological and climatic factors on measurements are considered. It is shown that CR-39 has high sensitivity to low radon concentrations, which makes it preferable for detailed studies of low pollution levels, while LR-115 is more effective for long-term monitoring due to its resistance to external influences. Particular attention is paid to the influence of environmental parameters (temperature, humidity, pressure) and calibration methods on the accuracy

of the results. Current problems associated with data interpretation, including errors due to track etching methods and visualization of results are considered. The need for standardization of measurement methods and prospects for automation of analysis processes using digital technologies are emphasized. The results of the work can be used in developing radiation safety strategies, monitoring radon levels in residential and industrial areas, and in environmental monitoring. Recommendations are proposed for the optimal use of track detectors for assessing radiation risks and developing more effective methods for detecting radon in various environments.

Keywords: Radon, track detectors, CR-39, RADUET, LR-115, RadonEye Plus2, SSNTD detector calibration.

References

1. NKDAR OON, *Nauchnyj komitet OON po dejstvu atomnoj radiacii, Istochniki i dejstvie ionizirujushhego izluchenija*, Tom I Prilozhenie A: Metodologii ocenki doz, Organizacija Obedinennyh Nacij, N'ju-Jork, 2000
2. MKRZ, *Mezhdunarodnaja komissija po radiologicheskoj zashhite ot radona-222 doma i na rabote*, Otchet MKRZ 65, Pergamon, Oksford, 1993
3. H. Idriss, I. Salih, A.S. Abdulaziz, M.Ju. Abdel'galil, S.A. Salih, A.M. Hasan, M.A. Jel.Tahir, M.M.O. Ahamed, *Issledovanie radona v pochvennom gaze, mikrojelementov i klimaticheskikh parametrov vokrug shtata Juzhnyj Kordofan*, Sudan, Nauki ob okruzhajushhej srede Zemli, 2014;72(2):335-339
4. V.V. Nazaroff, A.V. Nero-mladshij, *Radon i produkty ego raspada v vozduhe pomeshhenij*, John Wiley and Sons, N'ju-Jork, 1988
5. G. Akerblom, K. Vil'son, *Radon-geologicheskie aspekty jekologicheskoj problemy*. Otchet № 30, Geologicheskaja sluzhba Shvecii, Uppsala, 1982
6. A.E.A. Elzain, *Opredelenie koncentracii radija i skorosti vydelenija radona v obrazcah pochvy s ispol'zovaniem CR-39*, Dostizhenija v prikladnyh nauchnyh issledovanijah, 2015;6(2):92-102
7. A.E.A. Elzain, Y.Sh. Mohammed, Kh.Sh. Mohamed, A.M. Mohamed-Ali, *Issledovanie koncentracii radija i skorosti vydelenija radona v obrazcah pochvy iz goroda Kassala*, Sudan, s ispol'zovaniem SSNTD, Amerikanskij zhurnal fiziki i prilozhenij, 2016;4(4):84-89
8. F. Abu-Dzharad, *Primenenie detektora jadernogo trekovogo travlenija dlja izmerenij, svjazannyh s radonom*, Mezhdunarodnyj zhurnal po primeneniju radiacii i priborostroeniju, chast' D, Jadernye treki i radiacionnye izmerenija, 1988;15(1):525-534
9. K.N. Ju, T.F. Chan, Je.M. Jang, *Izmenenie skorosti vydelenija radona s poverhnostej zdanij raznogo vozrasta*, Health Physics, 1995;68(5):716-718
10. M. Beocco i dr., *Izmerenie urovnja radona v pomeshhenijah v rajone Bolon'i*, Trudy 15-j Mezhdunarodnoj konferencii po trekam chastic v tverdyh telah, Marburg, Germanija, 1990. стр. 29
11. H. Dzhebur Dzhabbar, R.H. Abdul Subber, Tuama Saadon Vedzhud, *Kalibrovka CR-39 dlja razlichnyh vysot dozimetrov radona i primenenie koncentracii radona v otlozhenijah reki Mahadzhran v muhafaze Basra*, Irak, Zhurnal fiziki: Serija konferencij, 2019
12. E. Kouroukla¹, T.D. Gooding, H.S. Fonseca, *Analiz metodov snizhenija urovnja radona: 10-letnij obzor*, Zhurnal radiologicheskoj zashhity, 2024. стр. 44
13. Mohammademad Adeliha, Amin Shahrohi, Morteza Imani, Stanislav Halupnik, Tibor Kovach, *Radiologicheskaja ocenka koncentracii radona i torona v pomeshhenijah i karta radona v zhilyh pomeshhenijah v Meshhede*, Iran, Int. J. Environ. Res. Public Health, 2021. 18, 141

14. A. Panlaki, F. Ballesteros, *Urovni radona v peshherah ostrova Bohol*, Filippiny, 18-ja Mezhdunarodnaja konferencija po jekologicheskoj nauke i tehnologijam, 2023
15. Atangana Bingana, Martin Serge, Takoukam Soh, Serge Didier, Bineng Guillaume Samuel, Chutima Kranrod, Yasutaka Omori, Masahiro Hosoda, Saïdou, Shinji Tokonami, *Assessment of Radiological Risks due to Indoor Radon, Thoron and Progeny, and Soil Gas Radon in Thorium-Bearing Areas of the Centre and South Regions of Cameroon*, Atmosphere 2023. 1708
16. Doktor Mahamudul Hasan, Miroslav Dzhanik, Shiha Pervin, Takeshi Iimoto, *Predvaritel'noe vozdejstvie radona i torona na naselenie v Dakke*, Bangladesh, Atmosfera 2023, 14, 1067
17. F. Omonya Wanjala, N.O. Hashim, D. Otwoma, J. Kebwaro, M. Chege, C. Nyambura, Atieno Carmen, *Lung Cancer Risk Assessment due to Radon and Thoron Exposure in Dwellings in Ortum, Kenya*, Journal of Environment Pollution and Human Health, 2021, Vol. 9, No. 2, 64-70
18. I. Dimitrova, J.M. Wasikiewicz, V. Todorov, S. Georgiev, Z. Daraktchieva, C.B. Howarth, D.A. Wright, B. Sabot, K. Mitev, *Coherent long-term average indoor radon concentration estimates obtained by electronic and solid state nuclear track detectors*, Radiation Physics and Chemistry 226 (2025) 112212
19. Pem Varkentin, Jerin Karri, Ogenekome Majkl, Brajan B'orndal, *Sravnenie jelektronnyh radonovyh monitorov potrebitel'skogo klassa*, Zhurnal radiologicheskoj zashhity. 2020. 1258–1272 (15 стр.)
20. G. Suman, K.Vinay Kumar Reddy, M. Sreenath Reddy, Ch.Gopal Reddy, P.Yadagiri Reddy, *Radon and thoron levels in the dwellings of Buddonithanda: a village in the environs of proposed uranium mining site, Nalgonda district, Telangana state, India*, Scientific Reports, (2021) 11:6199
21. Adzhaj Kumara, Sumit Sharma, Rohit Mehrab, Saurabh Narang, Rozalin Mishrad, *Ocenka koncentracij radona i torona v pomeshhenijah i ih svjaz' s sezonnymi kolebanijami i geologiej rajona Udampur, Dzhammu i Kashmir, Indija*, Mezhdunarodnyj zhurnal ohrany truda i okruzhajushhej sredy. 2017
22. Dzhon Majlz, *Metody izmerenija radona i pribory*, Nacional'nyj sovet po radiologicheskoj zashhite, Chilton, Didkot, Oksfordshir
23. Dzhoan F. Rej, Nikolja Mejsser, Dushan Licina, Zhojel' Gojet Perno, *Ocenka jeffektivnosti aktivnyh datchikov radona i passivnyh dozimetrov pri nizkih i vysokih koncentracijah radona*, Stroitel'stvo i okruzhajushhaja sreda 250. 2024
24. Diego Val'karse, Al'berto Al'varellas, Huan Ramon Rabun'jal', Hulian Dorado, Markos Gestal, *Sistema monitoringa radona na osnove mashinnogo obuchenija*, Hemosensory 2022, 10, 239

Сведения об авторах:

Ж.О. Насилов – PhD докторант, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

К.Ш. Жумадилов – автор для корреспонденции, PhD, профессор, заведующий Международной кафедры «Ядерной физики, новых материалов и технологий», Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Ж.А. Байгазинов – PhD, Председатель правления АО «Парк ядерных технологий», Курчатов, область Абай, Казахстан

Н. Нурсултанова – PhD докторант, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

В.Ф. Степаненко – доктор биологических наук, профессор, заведующий лабораторией медико-экологической дозиметрии и радиационной безопасности МРНЦ имени А.Ф. Цыба – филиала ФГБУ «НМИЦ радиологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации

А.И. Иванников – доктор биологических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории медико-экологической дозиметрии и радиационной безопасности МРНЦ имени А.Ф. Цыба – филиала ФГБУ «НМИЦ радиологии» Министерства здравоохранения Российской Федерации

М. Хоши – почетный профессор Университета Хиросимы, Хиросима, Япония

А.М. Андабаева – магистрант, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан.

Ж.О. Насилов – PhD докторант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

К.Ш. Жумадилов – хат-хабар авторы, PhD, профессор, «Ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар» халықаралық кафедрасының меңгерушісі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Н. Нурсултанова – PhD докторант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Ж.А. Байгазинов – PhD, «Ядролық технологиялар паркі» АҚ басқарма төрағасы, Курчатова, Абай облысы, Қазақстан

В.Ф. Степаненко – биология ғылымдарының докторы, профессор, Ресей Денсаулық сақтау министрлігінің «НМИЦ радиология» ФМБУ филиалы А.Ф. Цыба атындағы мрнц медициналық-экологиялық дозиметрия және радиациялық қауіпсіздік зертханасының меңгерушісі

А.И. Иванников – биология ғылымдарының докторы, профессор, Ресей Денсаулық сақтау министрлігінің «НМИЦ радиология» ФМБУ филиалы А.Ф. Цыба атындағы мрнц медициналық-экологиялық дозиметрия және радиациялық қауіпсіздік зертханасының жетекші зерттеушісі

М. Хоши – Хиросима университетінің құрметті профессоры, Хиросима, Жапония

А.М. Андабаева – магистрант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан.

Zh.O. Nassilov – PhD student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

K.Sh. Zhumadilov – corresponding author, PhD, professor, Head of the International Department of «Nuclear Physics, New Materials and Technologies», L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Zh.A. Baigazinov – PhD, Chairman of the Board of JSC «Park of Nuclear Technologies», Kurchatov, Abay Region, Kazakhstan

N. Nursultanova – PhD student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

V.F. Stepanenko – doctor of Biological Sciences, professor, Head of the Laboratory of Medical-Ecological Dosimetry and Radiation Safety of the MRRC named after A.F. Tsyba - a branch of the Federal State Budgetary Institution «National Medical Research Center of Radiology» of the Russian Ministry of Health

A.I. Ivannikov – doctor of Biological Sciences, professor, leading researcher of the Laboratory of Medical-Ecological Dosimetry and Radiation Safety of the MRRC named after A.F. Tsyba - a branch of the Federal State Budgetary Institution «National Medical Research Center of Radiology» of the Russian Ministry of Health

M. Hoshi – emeritus professor at Hiroshima University, Hiroshima, Japan

A.M. Andabayeva – master course student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).