



МРНТИ 29.15.01

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-152-3-56-66>

Научная статья

Оценка фоновой радиации на территории Казахстана методом ЭПР дозиметрии по зубной эмали

Н.С. Нурсултанова^{1*}, К.Ш. Жумадилов¹, Ж.О. Насилов¹, В.Ф. Степаненко²,
Ш. Тойода³, М. Хоши⁴

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

²МРНЦ имени А.Ф. Цыба – филиала ФГБУ «НМИЦ радиологии», Обнинск, Россия

³Институт палеонтологии и геохронологии Университета науки Окаяма, Окаяма, Япония

⁴Университет Хиросима, Хиросима, Япония

(E-mail: nazjan777.nn@gmail.com)

Аннотация. В данной обзорной статье проводится комплексный анализ современных исследований, посвящённых ЭПР-дозиметрии с использованием зубной эмали. Рассматриваются фундаментальные аспекты формирования радиационно-индуцированных сигналов, их физико-химическая природа и особенности взаимодействия с природными центрами парамагнитной активности. Анализируются свойства зубной эмали и её модельных систем, включая синтетические апатиты, а также методы регистрации, идентификации и количественной обработки ЭПР-спектров. Особое внимание уделено практическим аспектам дозиметрии, включая подготовку образцов, условия облучения и алгоритмы извлечения информации о дозе. Обсуждаются вопросы линейности дозового отклика, энергетической зависимости сигнала и факторов неопределённости. Актуальность исследования обусловлена растущей потребностью в надёжных методах оценки индивидуальных доз облучения при радиационных авариях, а также в задачах медицинской и экологической дозиметрии. ЭПР-дозиметрия с использованием зубной эмали демонстрирует высокий потенциал как независимый инструмент ретроспективной оценки дозы, обладающий стабильностью сигналов во времени и высокой чувствительностью к ионизирующему излучению. Представленный обзор охватывает как теоретические, так и прикладные аспекты метода, способствуя формированию целостного представления о его возможностях, ограничениях и путях дальнейшего развития.

В заключение рассматриваются перспективы дальнейшего развития метода, включая совершенствование спектрального анализа, уточнение моделей формирования сигнала и расширение областей применения ЭПР-дозиметрии в радиационной безопасности и биомедицинских исследованиях.

Ключевые слова: ЭПР-дозиметрия, зубная эмаль, парамагнитный резонанс, радионуклиды.

Поступила 02.09.2025. После доработки 05.09.2025. Принята к печати 08.09.2025. Доступна онлайн 30.09.2025.

^{1*}автор для корреспонденции

Введение

Фоновая радиация представляет собой совокупность ионизирующего излучения, обусловленного природными и техногенными источниками, и является неотъемлемой частью окружающей среды. Основными природными источниками радиационного фона являются космическое излучение, радионуклиды земной коры (уран-238, торий-232, калий-40), а также радиоактивный радон и его дочерние продукты. В то же время антропогенные факторы, включая остаточное радиационное загрязнение после ядерных испытаний, аварий на ядерных объектах и медицинские источники облучения, могут вносить дополнительный вклад в общую дозовую нагрузку на население [1].

Метод электронно-парамагнитного резонанса (ЭПР), используемый для исследования зубной эмали, является одним из наиболее эффективных подходов к ретроспективной оценке индивидуального радиационного облучения. Высокая чувствительность зубной эмали к накоплению ионизирующего излучения объясняется ее минеральным составом, в основе которого лежат кристаллы гидроксиапатита $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2]$ [2]. В процессе минерализации происходит частичная замена фосфатных и гидроксильных групп карбонатными соединениями, которые под воздействием ионизирующего излучения формируют устойчивые CO_2^- радикалы [3].

Поглощенная доза, зафиксированная в зубной эмали с помощью ЭПР-спектроскопии, отражает совокупное облучение, накопленное в течение всей жизни зуба, и включает как внешние, так и внутренние источники радиационного воздействия. В условиях естественного радиационного фона основными внешними факторами являются радиоактивные элементы земной коры и космическое излучение, тогда как внутреннее облучение обусловлено биокумуляцией природных радионуклидов, таких, как уран (U), торий (Th), калий-40 (K-40) и стронций-90 (Sr-90) [4]. Распределение и величина накопленной дозы могут значительно варьироваться в зависимости от географических и геологических характеристик местности.

Данное исследование направлено на детальную количественную оценку влияния фонового ионизирующего излучения с использованием ЭПР-анализов зубной эмали, что позволяет определить уровни накопленного радиационного воздействия и выявить возможные закономерности его пространственного распределения.

Материалы и методы

В рамках данного обзорного исследования была проведена систематическая оценка современных научных публикаций, посвященных применению метода электронно-парамагнитного резонанса (ЭПР)-дозиметрии для оценки фоновой радиации на население. Поиск литературы осуществлялся в международных базах данных Scopus, Web of Science, PubMed и Google Scholar за период 1990-2024 гг. Основное внимание уделялось публикациям, содержащим данные о применении ЭПР-дозиметрии зубной эмали для оценки хронического радиационного воздействия. В анализ включались как оригинальные экспериментальные исследования, так и систематические обзоры и

технические отчеты, позволяющие проследить динамику развития метода и выявить его актуальные направления. Предпочтение отдавалось публикациям на английском и русском языках с доступными количественными данными, что обеспечивало возможность последующего сравнительного анализа [2],[4],[5].

После отбора релевантных публикаций был проведен их критический анализ с целью выделения ключевых тенденций, методологических подходов и выявления расхождений в результатах различных исследований. Особое внимание уделялось сравнительному анализу методик ЭПР-дозиметрии, включая различные подходы к подготовке образцов, характеристики используемых спектрометров и способы калибровки дозиметрической шкалы. Анализ полученных дозовых значений позволил определить диапазоны накопленного облучения в различных регионах, оценить зависимость накопленных доз от природно-техногенных факторов, а также провести статистическую обработку данных для выявления закономерностей. Существенной частью исследования стало изучение методов интерпретации и верификации результатов, включающее сравнение доз, полученных методом ЭПР, с данными других дозиметрических подходов, анализ возможных ошибок и неопределенностей, а также выявление систематических погрешностей, связанных с вариабельностью природного радиационного фона и индивидуальными особенностями зубной эмали.

Результаты и обсуждение

В обзор включены исследования, посвящённые применению метода ЭПР-дозиметрии для оценки накопленного радиационного воздействия в различных условиях. Анализ охватывает работы, выполненные с использованием зубной эмали в качестве природного дозиметра. Основное внимание уделено сопоставлению методологических подходов различных авторов, включая калибровочные техники, обработку сигналов и интерпретацию полученных доз. Рассмотрены исследования, направленные на реконструкцию доз у населения, проживающего в районах с различными уровнями фонового и техногенного облучения, а также работы, оценивающие влияние медицинского рентгеновского облучения и аварийных ситуаций. Полученные результаты демонстрируют значительную вариативность накопленных доз, что подчёркивает важность стандартизации методик ЭПР-дозиметрии и необходимости учёта факторов, влияющих на точность измерений.

ЭПР-дозиметрия широко применяется для ретроспективной оценки накопленных доз облучения, особенно в исследованиях, связанных с радиационным воздействием на зубную эмаль. В различных работах использовались различные модели ЭПР-спектрометров, обеспечивающих высокую точность измерений [4],[5]. Например, в исследовании [4] применялся ЭПР-спектрометр JEOL JES-FA100 (Япония), который позволяет регистрировать радиационно-индуцированные сигналы с высокой чувствительностью. Аналогичный прибор использовался в исследовании [7], что подтверждает его надежность и распространность в дозиметрических исследованиях.

В то же время в работе [8] (2005) для измерений применялся Bruker ECS 106 (X-band EPR spectrometer), с помощью которого была проведена оценка накопленных доз облучения

зубной эмали в различных регионах Индии. Данный метод также использовался для дозиметрии выживших после атомных бомбардировок Хиросимы и Нагасаки, жертв радиационной аварии в Гоянии (Бразилия) и работников ядерного комплекса Маяк (Россия).

Таким образом, применение ЭПР-спектрометров различных моделей в исследованиях дозиметрии зубной эмали свидетельствует о высокой точности и воспроизводимости метода, что делает его надежным инструментом для ретроспективного определения накопленных доз радиационного облучения.

В исследованиях [7], а также [4] для оценки накопленных доз облучения использовался метод калибровочной зависимости, основанный на сравнении интенсивности ЭПР-сигнала зубной эмали с калибровочной кривой, полученной для образцов с известными дозами. В свою очередь, в работе [8] применялся не только метод калибровочной кривой, но и метод добавочной дозы, при котором образцы эмали подвергались дополнительному облучению от источника $^{60}\text{Со}$ для построения зависимости доза-сигнал. Использование метода добавочной дозы в дополнение к калибровочной зависимости позволяет более точно оценивать накопленные дозы, особенно в случае слабых радиационно-индуцированных сигналов, что расширяет возможности ретроспективной дозиметрии [9].

Для проведения ЭПР-измерений во всех рассмотренных исследованиях использовалась стандартная методика подготовки зубной эмали. В работах [7], [4], а также [8] эмаль отделялась от дентина, так как дентин создаёт высокий фоновый сигнал, мешающий точности измерений. Далее эмаль измельчалась в порошок с размером частиц 0,2-0,5 мм, причём в исследовании [8] использовалась агатовая ступка, а в казахстанских работах – механическое дробление. В работе [8] проводилась дополнительная очистка порошка 5M NaOH в ультразвуковой ванне и травление 20% уксусной кислотой, чего не делалось в других исследованиях. Для устранения механически индуцированных парамагнитных центров после измельчения образцы выдерживались 14 суток перед измерениями. Подготовленные порошки затем помещались в кварцевые капилляры диаметром 3 мм и взвешивались с точностью 100 ± 5 мг. Такой подход к подготовке образцов обеспечивал высокую точность измерений и позволял корректно оценивать накопленные дозы облучения [5].

В исследовании [7], [4], а также [8] использовались различные статистические методы для анализа накопленных доз облучения, полученных методом ЭПР-дозиметрии зубной эмали. В работе [7] применялась линейная регрессия (метод наименьших квадратов) для оценки возрастной зависимости накопленных доз, а также t-тест для сравнения доз между разными участками зубов. Было показано, что фоновая доза в регионах Семеновка и Бегенъ является относительно однородной ($p = 0,57$), а средняя накопленная доза составляла $34 \pm 3,9$ мГр. В исследовании [4] также применялся t-тест, но в сравнении доз между жителями Астаны, Степногорска и работниками урановой промышленности различия не были статистически значимыми ($p > 0,05$), за исключением тенденции к повышенным дозам в Степногорске ($p = 0,0623$). В отличие от этих исследований, в работе [8] использовались линейная регрессия для выявления возрастной зависимости дозы, а также метод гауссового распределения для анализа фонового облучения.

Здесь были обнаружены значимые региональные различия ($p < 0,05$), а также влияние медицинского рентгеновского облучения на накопленные дозы ($4,03 \pm 2,9$ мГр на один рентгеновский снимок) [2].

Таблица 1. Сравнительный анализ статистических методов и результатов исследований по ЭПР-дозиметрии зубной эмали

Исследование	Статистические методы	Основные результаты
Степногорск, Казахстан	<ul style="list-style-type: none">– Линейная регрессия (метод наименьших квадратов)– t-тест– Деконволюция ЭПР-спектров	<ul style="list-style-type: none">– Средняя фоновая доза: $34 \pm 3,9$ мГр– Различия между щёчной и язычной сторонами зубов не значимы ($p = 0,57$)– Накопленная доза увеличивается с возрастом
Астана, Казахстан	<ul style="list-style-type: none">– t-тест (GraphPad)– Сравнение доз между группами	<ul style="list-style-type: none">– Различие доз между городами Астана и Степногорск не значимо ($p = 0,1463$)– Различие между Степногорском и работниками урановой промышленности приближается к значимости ($p = 0,0623$)
Индия	<ul style="list-style-type: none">– Линейная регрессия– Гауссовое распределение– Сравнение средних значений	<ul style="list-style-type: none">– Средняя годовая доза: $0,96 \pm 0,14$ мГр/год– Различия между регионами значимы ($p < 0,05$)– Влияние рентгена: $4,03 \pm 2,9$ мГр на снимок

Мы провели t-тест анализ данных, представленных в трех исследованиях: Степногорск, Казахстан [4], область Абай, Казахстан [7], и Индия [8]. В результате анализа было установлено, что различия между группами статистически значимы ($p = 0,0419$). Для уточнения различий был выполнен попарный t-тест, который показал:

- Степногорск, Казахстан vs. Индия – различия значимы ($p = 0,0071$), что указывает на более высокие накопленные дозы у жителей Степногорска, вероятно, вследствие воздействия Семипалатинского полигона.
- Степногорск, Казахстан vs. область Абай, Казахстан – различия не являются статистически значимыми ($p = 0,0789$), что свидетельствует о схожих уровнях радиационного фона в этих регионах.
- Область Абай, Казахстан vs. Индия – различия не значимы ($p = 0,3938$), что говорит о близких значениях накопленных доз у жителей этих регионов.

Таким образом, основное различие наблюдается между Степногорском и Индией, что подтверждает влияние локальных источников радиации на уровень накопленного облучения.

Было проведено сравнение накопленных доз облучения у жителей Степногорска, области Абай и Индии с использованием ЭПР-дозиметрии зубной эмали. Статистический анализ показал значимые различия между выборками ($p = 0,0071$), что указывает на неоднородность уровней радиационного воздействия в этих регионах.

Для визуализации данных построен график рассеяния, где разными маркерами обозначены дозы:

- Красные треугольники (▲) – Степногорск.
- Зелёные кружки (●) – область Абай.
- Синие перевёрнутые треугольники (▼) – Индия.

График демонстрирует, что значения доз в области Абай и Степногорске отличаются значительной вариативностью, что может быть связано с наследием радиационного фона Семипалатинского испытательного полигона. В то же время дозы в Индии более сгруппированы и в среднем ниже, что указывает на естественное радиационное облучение в регионе.

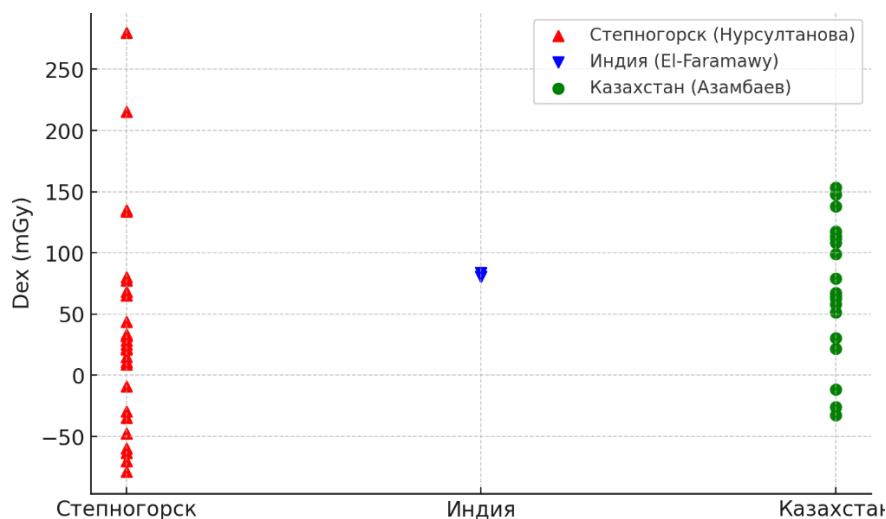


Рисунок 1. Сравнение накопленных доз облучения у жителей Степногорска, области Абай и Индии по данным ЭПР-дозиметрии зубной эмали.

Таким образом, анализ подтверждает значительные различия в накопленных дозах между регионами, что подчёркивает необходимость учета локальных факторов радиационного воздействия при проведении ретроспективной дозиметрии.

Заключение

В данном исследовании проведен сравнительный анализ накопленных доз ионизирующего облучения, определённых методом ЭПР-дозиметрии зубной эмали в различных регионах. Основное внимание уделено Степногорску, другим районам Казахстана и Индии. Результаты показали, что наиболее высокие дозы облучения зафиксированы у жителей Степногорска, что может быть связано с близостью к Семипалатинскому ядерному полигону. Метод ЭПР-дозиметрии продемонстрировал высокую чувствительность и воспроизводимость, позволяя оценивать дозовые нагрузки ретроспективно. Использование различных моделей ЭПР-спектрометров и методик подготовки образцов обеспечивает точность и сопоставимость данных. Статистический анализ подтвердил наличие значимых различий между регионами, особенно между Степногорском и Индией ($p = 0.0071$). При этом различия между Казахстаном и

Индией, а также между Степногорскими и другими регионами Казахстана, оказались незначимыми. Это свидетельствует о географической неоднородности радиационного фона. Полученные результаты подчеркивают важность учета локальных источников радиации при дозиметрических исследованиях. Метод ЭПР-анализов зубной эмали доказал свою эффективность как инструмент ретроспективной оценки хронического облучения населения.

Благодарность

Данная работа выполнена при финансовой поддержке по проекту Грантового финансирования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН АР19678341, договор № 269/23-25 от 03.08.2023), а также в рамках программно-целевого финансирования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН BR27101493, договор № 269/23-25 от 03.08.2023).

Вклад авторов

Все авторы внесли равный вклад в проведение исследования, анализ полученных результатов и подготовку рукописи. Каждый из авторов участвовал в обсуждении и согласовании окончательного варианта статьи.

Список литературы

1. P. Fattibene, F. Callens, EPR dosimetry with tooth enamel: A review, *Applied Radiation and Isotopes* 68(11), p. 2033–2116 (2010).
2. K. Zhumadilov, A.I. Ivannikov, V. Skvortsov, V. Stepanenko, Z. Zhumadilov, S. Endo, K. Tanaka, M. Hoshi, Tooth enamel EPR dosimetry: optimization of EPR spectra recording parameters and effect of sample mass on spectral sensitivity, *J. Radiat. Res.* 46, p. 435–442 (2005).
3. S. Toyoda, M. Ikeya, Thermal stability of paramagnetic centers in fossil tooth enamel: implication for ESR dating, *Journal of Archaeological Science* 18(2), p. 183–190 (1991).
4. Нұрсултанова Н.С., Жұмадилов К.Ш. Оценка влияния воздействия низких доз, *Вестник Евразийского национального университета им. Л. Н. Гумилева. Серия: Физико-математические науки* 2(118), p. 123–129 (2017).
5. K. Zhumadilov, A.I. Ivannikov, K.N. Apsalikov, Zh. Zhumadilov, S. Toyoda, D. Zarlyanova, E. Tieliewuhan, S. Endo, K. Tanaka, C. Miyazawa, T. Okamoto, M. Hoshi, Radiation dose estimation by tooth enamel EPR dosimetry for residents of Dolon and Bodene, *J. Radiat. Res.* 47, p. A47–A53 (2006).
6. K. Sh. Zhumadilov, A. I. Ivannikov, V. F. Stepanenko, V. G. Skvortsov, Sh. Toyoda, S. Endo, K. Tanaka, A. D. Kaprin, V. N. Galkin, S. A. Ivanov, T. V. Kolyzhenkov, U. A. Akhmedova, V. V. Bogacheva, M. Hoshi, EPR dosimetry of population living near the radioactive trace after the nuclear test on August 29, 1949, at the Semipalatinsk test site (2017).
7. С. . Азамбаев, К. Ш. Жұмадилов, Қазақстан тұрғындарының тіс әмалі арқылы ЭПР әдісімен фондық дозаны бағалау, *Вестник ЕНУ* 2, p. 266 (2017).
8. N. A. El-Faramawy, Estimation of radiation levels by EPR measurement of tooth enamel in Indian populations, *Applied Radiation and Isotopes* 62(2), p. 207–211 (2005).

9. M. Rodzi, K. Zhumadilov, M. Ohtaki, A. Ivannikov, D. Bhattacharjee, A. Fukumura, M. Hoshi, Estimation of background doses for the Peninsular Malaysia population by ESR dosimetry of tooth enamel, Radiat. Environ. Biophys. 57(4), p. 363–368 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00411-018-0748-1>

Н.С. Нұрсұлтанова^{*1}, К.Ш. Жұмадилов¹, Ж.О. Насилов¹, В.Ф. Степаненко², Ш. Тойода³, М. Хоши⁴

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

²А.Ф. Цыба атындағы MPFO – ФМБА «Ұлттық медициналық радиология ғылыми орталығы» филиалы, Обнинск, Ресей

³Оқаяма университеті, ғылым институты, Палеонтология және геохронология институты, Жапония

⁴Хиросима университеті, Хиросима, Жапония
(E-mail: nazjan777.nn@gmail.com)

Қазақстан аумағындағы фондық сәулеленуді тіс әмалі негізіндегі ЭПР дозиметрия әдісімен бағалау

Анната. Бұл шолулық мақалада тіс әмалін пайдалану арқылы жүргізілетін ЭПР-дозиметрияға арналған қазіргі зерттеулер кешенді түрде талданады. Жұмыста радиация индуцирлекен сигналдардың қалыптасуының фундаменталды қырлары, олардың физика-химиялық табиғаты және парамагниттік белсенділік орталықтарымен өзара әрекеттесу ерекшеліктері қарастырылады. Тіс әмалінің қасиеттері мен оның модельдік жүйелері, соның ішінде синтетикалық апатиттер, сондай-ақ ЭПР-спектрлерін тіркеу, сәйкестендіру және сандық өңдеу әдістері талданады.

Дозиметрияның практикалық аспектілеріне ерекше назар аударылады: ұлгілердің дайындау, сәулелендіру шарттары және дозалық ақпаратты алу алгоритмдері. Дозалық жауаптың сывықтылығы, сигналдың энергияға тәуелділігі және белгісіздік факторлары мәселелері талқыланады.

Зерттеудің өзектілігі радиациялық апattтар жағдайында жеке сәулелену дозасын сенімді бағалауға мүмкіндік беретін әдістерге өсіп келе жатқан қажеттілікпен, сондай-ақ медициналық және экологиялық дозиметриядағы міндеттермен негізделеді. Тіс әмалін пайдалану арқылы жүргізілетін ЭПР-дозиметрия уақыт өте келе сигналдардың тұрақтылығымен және иондаушы сәулеленуге жоғары сезімталдығымен ерекшеленіп, дозаны ретроспективті бағалаудың тәуелсіз құралы ретінде жоғары әлеуетке ие екендігін көрсетеді. Ұсынылған шолу жұмысы әдістің теориялық және қолданбалы аспектілерін қамти отырып, оның мүмкіндіктері, шектеулері және әрі қарай дамытудың жолдары жөнінде тұтас түсінік қалыптастырады.

Қорытынды бөлімде спектралдық талдауды жетілдіру, сигналдың қалыптасу модельдерін нақтылау және ЭПР-дозиметрияны радиациялық қауіпсіздік пен биомедициналық зерттеулер саласында кеңейте қолдану болашағы қарастырылады.

Түйін сөздер: ЭПР-дозиметрия, тіс әмалі, парамагниттік резонанс, радионуклидтер.

N. S Nursultanova^{*1}, K.Sh. Zhumadilov¹, Zh.O. Nasilov¹, V.F. Stepanenko², Sh. Toyoda³, M. Hoshi⁴

¹*International Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies,*

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²*A.F. Tsyb Medical Radiological Research Center – Branch of the National Medical Research Radiological Center, Obninsk, Russia*

³*Institute of Paleontology and Geochronology, Okayama University of Science, Japan*

⁴*Hiroshima University, Hiroshima, Japan*

(E-mail: ¹nazjan777.nn@gmail.com)

Assessment of Background Radiation in Kazakhstan Using EPR Dosimetry of Tooth Enamel

Abstract. This review article provides a comprehensive analysis of contemporary studies devoted to EPR dosimetry using tooth enamel. The fundamental aspects of radiation-induced signal formation, their physico-chemical nature, and specific interactions with intrinsic paramagnetic centers are considered. The structural and dosimetric properties of tooth enamel and its model systems, including synthetic apatites, are analyzed, along with advanced approaches for the registration, identification, and quantitative evaluation of EPR spectra.

Special attention is given to the practical aspects of dosimetry, including sample preparation, irradiation conditions, and algorithms for extracting dose-related information. Issues of dose-response linearity, energy dependence of the signal, and sources of uncertainty are critically discussed.

The relevance of the study arises from the increasing demand for reliable methods of individual dose assessment in cases of radiation accidents, as well as in medical and environmental dosimetry. EPR dosimetry based on tooth enamel demonstrates high potential as an independent tool for retrospective dose reconstruction, characterized by long-term signal stability and high sensitivity to ionizing radiation. The review integrates both theoretical and applied aspects of the method, contributing to a holistic understanding of its capabilities, limitations, and avenues for further development.

In conclusion, the prospects for advancing the method are outlined, including improvements in spectral analysis, refinement of signal formation models, and the broadening of EPR dosimetry applications in radiation protection and biomedical research.

Keywords: EPR dosimetry, tooth enamel, paramagnetic resonance, radionuclides.

References

1. P. Fattibene, F. Callens, EPR dosimetry with tooth enamel: A review, *Applied Radiation and Isotopes*, 68(11), pp. 2033–2116 (2010).
2. K. Zhumadilov, A.I. Ivannikov, V. Skvortsov, V. Stepanenko, Z. Zhumadilov, S. Endo, K. Tanaka, M. Hoshi, Tooth enamel EPR dosimetry: optimization of EPR spectra recording parameters and effect of sample mass on spectral sensitivity, *J. Radiat. Res.*, 46, pp. 435–442 (2005).
3. S. Toyoda, M. Ikeya, Thermal stability of paramagnetic centers in fossil tooth enamel: implication for ESR dating, *Journal of Archaeological Science*, 18(2), pp. 183–190 (1991).
4. N.S. Nursultanova, & K.Sh. Zhumadilov. Otsenka vliyaniya vozdeystviya nizkikh doz [Assessment of the impact of low dose exposure], *Vestnik Evraziyskogo natsionalnogo universiteta im. L.N. Gumilyova*.

Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki [Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Series: Physical and Mathematical Sciences], 2(118), pp. 123–129 (2017). [in Russian]

5. K. Zhumadilov, A.I. Ivannikov, K.N. Apsalikov, Zh. Zhumadilov, S. Toyoda, D. Zarlyanova, E. Tieliewuhan, S. Endo, K. Tanaka, C. Miyazawa, T. Okamoto, M. Hoshi, Radiation dose estimation by tooth enamel EPR dosimetry for residents of Dolon and Bodene, *J. Radiat. Res.*, 47, pp. A47–A53 (2006).

6. K. Sh. Zhumadilov, A.I. Ivannikov, V. F. Stepanenko, V. G. Skvortsov, Sh. Toyoda, S. Endo, K. Tanaka, A. D. Kaprin, V. N. Galkin, S.A. Ivanov, T.V. Kolyzhenkov, U. A. Akhmedova, V. V. Bogacheva, M. Hoshi, EPR dosimetry of population living near the radioactive trace after the nuclear test on August 29, 1949, at the Semipalatinsk test site (2017).

7. S.B. Azambaev, & K.Sh. Zhumadilov. Qazaqstan turghyndarynyн tis emali arqyly EPR ädisimen fonlyk dozany bagalau [Estimation of background dose using tooth enamel EPR method for Kazakhstan residents], *Vestnik ENU* [Bulletin of ENU], 2, p. 266 (2017). [in Kazakh]

8. N. A. El-Faramawy, Estimation of radiation levels by EPR measurement of tooth enamel in Indian populations, *Applied Radiation and Isotopes*, 62(2), pp. 207–211 (2005).

9. M. Rodzi, K. Zhumadilov, M. Ohtaki, A. Ivannikov, D. Bhattacharjee, A. Fukumura, M. Hoshi, Estimation of background doses for the Peninsular Malaysia population by ESR dosimetry of tooth enamel, *Radiat. Environ. Biophys.*, 57(4), pp. 363–368 (2018). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00411-018-0748-1>

Сведения об авторах:

Нұрсұлтанова Н. – автор для корреспонденции, PhD докторант, Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Кажымукана, 13, г. Астана, Казахстан.

Жұмадилов К.Ш. – PhD, профессор, заведующий международной кафедрой ядерной физики, новых материалов и технологий, Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Кажымукана, 13, г. Астана, Казахстан.

Насилов Ж.О. – PhD докторант, Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Кажымукана, 13, г. Астана, Казахстан.

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

Тойода Ш. – профессор Института палеонтологии и геохронологии Университета науки Окаймы.

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

Нұрсұлтанова Н. – хат-хабар авторы, PhD докторант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана қ., Қазақстан.

Жұмадилов К.Ш. – хат-хабарларға жауапты автор, PhD, профессор, «ядролық физика, жаңа материалдар және технологиялар халықаралық кафедрасының» менгерушісі, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана қ., Қазақстан.

Насилов Ж.О. – PhD докторант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қажымұқан көш., 13, Астана қ., Қазақстан.

Степаненко В.Ф. – биология ғылымдарының докторы, профессор, Ресей Федерациясы Денсаулық сақтау министрлігінің «Радиациялық медицина үлттық ғылыми-зерттеу орталығы» ФМБА А.Ф. Цыба атындағы Медициналық радиологиялық ғылыми орталығы филиалының медико-экологиялық дозиметрия және радиациялық қауіпсіздік зертханасының меншерушісі.

Тоидә Ш. – Окайма ғылым университеті, Палеонтология және геохронология институтының профессоры, Жапония.

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

Nursultanova N. – Corresponding Author, PhD student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 13 Kazhymukan Street, Astana, Kazakhstan.

Zhumadilov K.Sh. – PhD, Professor, Head of the International Department of Nuclear Physics, New Materials and Technologies, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 13 Kazhymukan Street, Astana, Kazakhstan.

Nasilov Zh.O. – PhD student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 13 Kazhymukan Street, Astana, Kazakhstan.

Stepanenko V.F. – Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Medical and Environmental Dosimetry and Radiation Safety, A.F. Tsyb Medical Radiological Research Center – Branch of the National Medical Research Radiological Center, Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia.

Toyoda Sh. – Professor, Institute of Paleontology and Geochronology, Okayama University of Science, Japan.

Hoshi M. – Professor Emeritus, Hiroshima University, Hiroshima, Japan.



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/>).