

ЭЛЕКТРОННАЯ ПАРАМАГНИТНАЯ РЕЗОНАНСНАЯ ДОЗИМЕТРИЯ В ПРАКТИКЕ СУДЕБНО-МЕДИЦИНСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАДИАЦИОННОЙ ТРАВМЫ



КВАЧЕВА Ю.Е.,

к.м.н., доцент, доцент
кафедры судебной медицины ФГБОУ ДПО «Рос-
сийская медицинская академия непрерывного про-
фессионального образования» Минздрава России,
эксперт МАГАТЭ, forensdeprmanpo@gmail.com

Представлены обобщенные и актуализированные данные современных исследований, посвященных применению электронной парамагнитной резонансной дозиметрии в практике судебно-медицинских исследований общей и местной радиационных травм. Определены перспективные направления для дальнейшего изучения вопроса.

Ключевые слова: электронный парамагнитный резонанс, электронная парамагнитная резонансная дозиметрия, судебно-медицинская экспертиза, общая радиационная травма, местная радиационная травма, ионизирующее излучение.

ELECTRON PARAMAGNETIC RESONANCE DOSIMETRY IN THE PRACTICE OF FORENSIC ANALYSIS OF RADIATION INJURIES

Kvacheva Yu.

The paper presents generalized and updated results of modern researches dedicated to the use of the electron paramagnetic resonance dosimetry in forensic analysis of general and local radiation injuries. Promising areas are identified for further study of this issue.

Key words: electron paramagnetic resonance, electron paramagnetic resonance dosimetry, forensic analysis, general radiation injury, local radiation injury, ionizing radiation.

Введение

Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), впервые экспериментально обнаруженный в 1944 г. выдающимся советским физиком-экспериментатором Героем Социалистического Труда, лауреатом Ленинской премии Е.К. Завойским (1907–1976), нашел широкое применение в разных областях фундаментальных и прикладных исследований. В 1991 г. была учреждена Международная премия имени Е.К. Завойского, вручаемая ежегодно за выдающийся вклад в применение и развитие ЭПР в физике, химии, экологии, биологии и других отраслях науки. Значительное влияние ЭПР оказал на формирование современных медицинских технологий, что, наряду с клиническими дисциплинами, наглядно демонстрируют достижения судебно-медицинской экспертизы (СМЭ) радиационной травмы.



**Евгений
Константинович
ЗАВОЙСКИЙ**

Цель исследования

Обобщение и актуализация данных современных исследований, посвященных применению ЭПР-дозиметрии в практике судебно-медицинских исследований общей и местной радиационных травм, а также раскрытие перспектив для дальнейшего изучения вопроса.

Материалы и методы

Исследование проводилось на основе анализа оригинальных публикаций в изданиях, включенных в международные и отечественные базы данных (e.Library, Ru, Cyberleninka, PubMed, Google Scholar, Scopus), а также опубликованных в открытой печати и электронных ресурсах международных организаций по радиационной безопасности официальных изданий, посвященных тематике настоящей статьи.

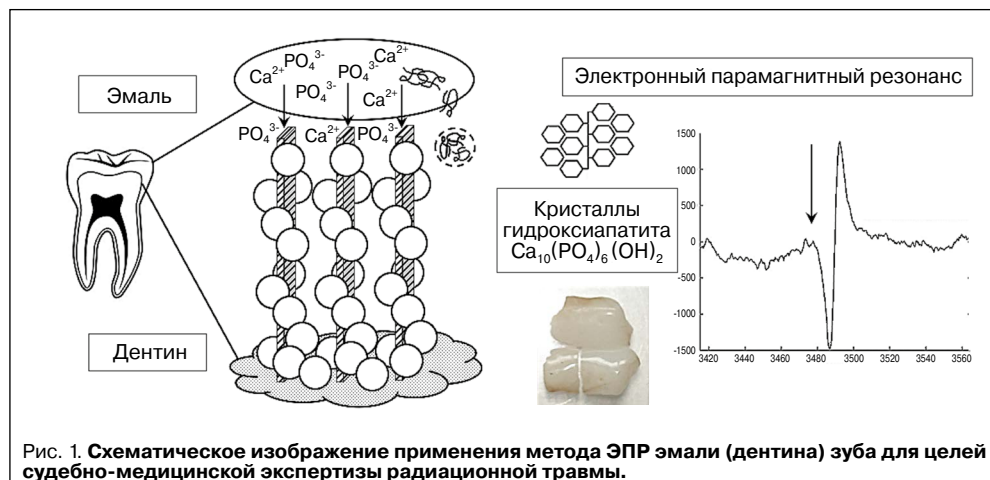
Результаты и обсуждение

Метод ЭПР-дозиметрии применяется в практике СМЭ радиационной травмы на протяжении последних десятилетий. Учитывая, что, как правило, радиационные инциденты чрезвычайно сложны для расследования, метод ЭПР имеет важное, а зачастую решающее значение для оценки локальных поглощенных доз внешнего фотонного облучения, позволяя решать задачи дозиметрического анализа, недоступные для других методов [1]. Традиционными объектами исследования, направляемыми на ЭПР-спектрометрию, являются эмаль (реже – дентин) зуба, ногти, кости и предметы одежды из белой/неокрашенной хлопчатобумажной ткани с минимальными загрязнениями, находившиеся на потерпевшем в момент радиационного воздействия. По формальным осно-

ваниям рассматриваемый метод относится к области физической дозиметрии, однако, учитывая, что «дозиметром» в данном случае являются собственные биологические ткани потерпевших, его можно отнести и к методам биологической дозиметрии [2].

Наибольшей информативностью в измерении дозовых нагрузок методом ЭПР обладают исследования зубной эмали, признаваемой в настоящее время «универсальным биологическим дозиметром». Основной принцип, положенный в его основу, заключается в том, что под действием ионизирующего излучения в эмали зуба, состоящей преимущественно из гидроксиапатита Ca^{2+} , образуются свободные радикалы. Будучи встроенными в высокоупорядоченную кристаллическую решетку, обмен веществ в которой характеризуется чрезвычайно низкой интенсивностью, такие радикалы способны существовать неограниченно долго ($\approx 10^7$ – 10^9 лет), формируя стабильные парамагнитные центры, доступные для регистрации в момент резонанса по изменению характеристик магнитного поля в виде пиков (рис. 1). Минимально измеряемая доза внешнего гамма-облучения зубной эмали методом ЭПР-дозиметрии составляет 0,05 Гр [3].

Принципы определения дозы облучения с помощью ЭПР ногтей, костных фрагментов и предметов одежды аналогичны таковым при анализе эмали зуба, однако минимально детектируемые дозовые нагрузки не превышают 0,5–1 Гр. Следует также иметь в виду, что исследования вышеперечисленных объектов ограничены относительно быстрым ослаблением в них ЭПР-сигнала (в тканях материалов предметов одежды постоянная времени спада сигнала составля-



ет порядка 200 суток), что может вносить ограничения во временные сроки проведения измерений.

В случаях смертельной радиационной травмы для ретроспективной оценки поглощенной дозы по величине ЭПР на исследование направляются изымаемые при аутопсии моляры, не имеющие патологических изменений, в количестве одного-двух [4]. У живых лиц изначально для определения индивидуальной поглощенной дозы необходимым было инвазивное изъятие образцов эмали, требовавшее экстракции зуба целиком для проведения ЭПР-измерений *ex vivo*. В дальнейшем была предложена методика прижизненного отбора мини-проб («биоштатов») эмали с применением специального стоматологического бора и последующим восстановлением зуба светоотверждаемыми композитными материалами [5].

В настоящее время, с появлением малогабаритных портативных сцинтилляционных детекторов, актуальными становятся измерения *in vivo* («на месте») [6], что устраняет необходимость в инвазивных манипуляциях с формированием анатомических нарушений и, как следствие, нивелирует физические страдания и негативные психологические реакции исследуемых живых лиц. Важным преимуществом ЭПР-измерений зубной эмали «на месте» представляется также расширение экспертных возможностей по реконструкции событий с массовым числом потерпевших [7].

Тенденция постепенного перехода от инвазивных к неинвазивным аналитическим процедурам отчетливо прослеживается также в ЭПР-спектрометрии ногтей [8]. В последние годы совершенствование измерительных технических средств значительно расширило возможности по исследованию ногтевых пластин *in vivo*, включая синхронные измерения *in toto* на пальцах рук и ног («10+10»). Такой подход, в первую очередь, устраняет неопределенности, связанные с механически индуцируемым сигналом (МИС). Последний неизбежно привносится в измерения *ex vivo* травматизацией дистального края ногтя при его срезании и требует последующего вычитания при оценке величины «чистой» радиационной составляющей спектра (радиационно индуцированного сигнала, РИС). Кроме того, ЭПР-исследования ногтевых пластин *in vivo* способствуют повышению объективности выводов СМЭ в части вынесения суждений о равномерности/неравномерности облучения потерпевших.

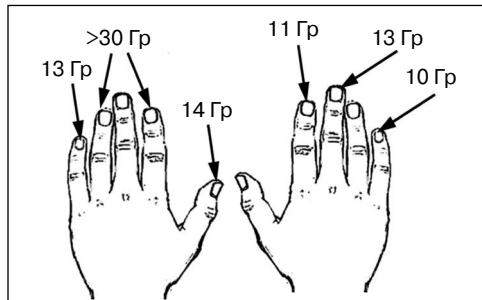


Рис. 2. ЭПР-дозиметрия ногтевых пластин при судебно-медицинской экспертизе местной радиационной травмы (неравномерное облучение; прогнозируемый неблагоприятный исход радиационного повреждения [2]).

Существенное место ЭПР-дозиметрия как специальный метод исследования занимает в СМЭ местной радиационной травмы. Согласно данным МАГАТЭ по инцидентам и незаконному обороту радиоактивных материалов (IAEA Incident and Trafficking Database) [9] наибольшее число происшествий с локальным облучением потерпевших имеет место в ситуациях с так называемыми потерянными или похищенными (в результате грубых нарушений правил эксплуатации, хранения, транспортировки или захоронения) источниками ионизирующих излучений. При этом наиболее частой локализацией лучевых ожогов (до 80% всех наблюдений) становятся кисти рук. В тех случаях, когда прогноз местного радиационного поражения на основании результатов ЭПР-анализа ногтевых пластин расценивается как неблагоприятный (рис. 2), врач – судебно-медицинский эксперт отвечает на все вопросы, поставленные перед экспертизой следственными органами, за исключением вопроса о степени тяжести вреда, причиненного здоровью потерпевшего. Этот вопрос может быть решен только после формирования окончательного исхода радиационной травмы, когда эксперт получает возможность определить процент стойкой утраты общей трудоспособности. Таким образом, экспертиза может считаться завершенной только при определившемся исходе повреждения от действия ионизирующего излучения.

Ближнесрочные перспективы применения ЭПР-спектрометрии для целей СМЭ радиационной травмы следует связывать с исследованиями по неинвазивной оценке *in vivo* локальной дозы облучения конечностей (кости пальцев) у живых лиц, в настоящее время доступной лишь

при измерениях *ex vivo* на операционном материале хирургических вмешательств (ампутированные фаланги и фрагменты костей, изымаемые при хирургической ревизии очаговых поражений) [10]. Кроме того, перспективными видятся дальнейшие усилия по разработке и утверждению единого протокола изъятия объектов для ЭПР-дозиметрии. Как свидетельствует экспертная практика, в его отсутствие существенным образом снижается «перспективность» проведения ситуационных экспертиз [11].

Наконец, важное значение в совершенствовании мероприятий по реконструкции событий радиационных инцидентов приобретает освоение современных достижений ЭПР-спектрометрии, связанных с детектированием ЭПР-сигнала в стеклах наручных часов, очков и мобильных телефонов, расширяющих перечень подлежащих изъ-

ятию и экспертному анализу небиологических объектов, находившихся при потерпевшем в момент облучения [12].

Заключение

Метод ЭПР-дозиметрии, применяемый в практике судебно-медицинской экспертизы радиационной травмы на протяжении последних десятилетий, остается в числе наиболее современных и объективных методов оценки доз внешнего облучения.

С учетом проанализированных материалов представляется актуальным проведение дальнейших масштабных работ по совершенствованию стандартных протоколов ЭПР-спектрометрических измерений для целей судебно-медицинской экспертизы повреждений от действия ионизирующего излучения, что составит основу мероприятий по модернизации данного вида экспертного исследования.

Литература

1. Swartz H.M., Flood A.B. *EPR biodosimetry: challenges and opportunities* // *Radiat. Prot. Dosimetry*. – 2023; 199(14):1441-1449. Doi: 10.1093/rpd/ncad009
2. Trompier F., Queinnee F., Bey E. et al. *EPR retrospective dosimetry with fingernails: report on first application cases* // *Health Phys.* – 2014; 106(6):798-805. Doi: 10.1097/HP.000000000000110
3. Romanyukha A., Trompier F., Reyes R.A. *Q-band electron paramagnetic resonance dosimetry in tooth enamel: biopsy procedure and determination of dose detection limit* // *Radiat. Environ. Biophys.* – 2014; 53(2):305-10. Doi: 10.1007/s00411-013-0511-8
4. Квачева Ю.Е., Глазунов А.Г. Особенности организации и производства судебно-медицинской экспертизы трупов лиц, погибших от острой лучевой болезни // *Судебно-медицинская экспертиза*. – 2012. – Т. 55, № 2. – С. 43–45.
5. Williams B.B., Dong R., Kmiec M. et al. *Development of in vivo tooth EPR for individual radiation dose estimation and screening* // *Health Phys.* – 2010; 98(2):327-38. Doi: 10.1097/HP.0b013e3181a6de5d
6. Swartz H.M. *Using stable free radicals to obtain unique and clinically useful data in vivo in human subjects* // *Radiat. Prot. Dosimetry*. – 2016; 172(1-3):3-15. Doi: 10.1093/rpd/ncw323
7. Flood A.B., Williams B.B., Schreiber W. et al. *Advances in in vivo EPR Tooth biodosimetry: meeting the targets for initial triage following a large-scale radiation event* // *Radiat. Prot. Dosimetry*. – 2016; 172(1-3):72-80. Doi: 10.1093/rpd/ncw165
8. Swarts S.G., Sidabras J.W., Grinberg O. et al. *Developments in biodosimetry methods for triage with a focus on X-band electron paramagnetic resonance in vivo fingernail dosimetry* // *Health Phys.* – 2018; 115(1):140-150. Doi: 10.1097/HP.0000000000000874
9. IAEA. *Incident and Trafficking Database (ITDB)*. <https://www.iaea.org/resources/databases/itdb>
10. Zdravkova M., Crockart N., Trompier F. et al. *Non-invasive determination of the irradiation dose in fingers using low-frequency EPR* // *Phys. Med. Biol.* – 2004; 49(13):2891-8. Doi: 10.1088/0031-9155/49/13/009
11. Квачева Ю.Е., Ковалев А.В., Грибунов Ю.П., Шестакова И.Н. *Смертельная радиационная травма вследствие умышленного применения источника ионизирующего излучения в противоправных целях* // *Судебно-медицинская экспертиза*. – 2024. – № 2. – С. 39–42. Doi: 10.17116/sudmed20246702139
12. Marciniak A., Ciesielski B., Juniewicz M. *EPR dosimetry in glass: a review* // *Radiat. Environ. Biophys.* – 2022; 61(2):179-203. Doi: 10.1007/s00411-022-00970-w