УДК 519.22:539.12.08

ЭПР-ДОЗИМЕТРИЯ КАК СРЕДСТВО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ ЛЮДЕЙ ПРИ НЕКОНТРОЛИРУЕМЫХ РАДИАЦИОННЫХ СИТУАЦИЯХ

(материалы доклада в форме расширенной презентации)

Е. А. Шишкина

ФГБУН УНПЦ РМ ФМБА России, г. Челябинск

Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) – резонансное поглощение электромагнитного излучения неспаренными электронами. Метод однозначно различает примесные ионы, изоморфно входящие в кристаллическую решетку, а также органические свободные радикалы и позволяет получить детальные сведения о ионе в структуре окружающих атомов и молекул (валентность, гибридизация электронов, химические связи и т. д.). Возможность измерять методом ЭПР радиационно-индуцированные радикалы – это основа ЭПР-дозиметрии. Стабильность радиационно-индуцированных радикалов – главное условие выбора дозиметра при восстановлении доз облучения post factum (при неконтролируемых радиационных ситуациях). Сегодня методы ЭПР-дозиметрии разрабатываются как для экстренного реагирования на неконтролируемые радиационные инциденты, так и для ретроспективных оценок доз.

Одним из самых надежных биологических ЭПР-дозиметров оказались и кальцифицированные ткани и в особенности эмаль зубов. Метод ретроспективной ЭПР-дозиметрии на эмали зубов широко используется во всем мире для дозиметрии внешнего облучения. Однако у метода есть серьезные сложности: доступность образцов зубов и отсутствие метрологического стандарта для биообразцов.

Другая проблема – присутствие в эмали остеотропных радионуклидов. В частности, в эмали зубов жителей Уральского региона, проживавших на радиоактивно загрязненных территориях, присутствовал ^{90}Sr. В работе приведен обзор методов и подходов, позволивших преодолеть метрологические проблемы и учесть дозу внутреннего облучения эмали. Показано, что даже при высоких неопределенностях оценок малых и средних доз метод ЭПР-дозиметрии – хороший инструментом ретроспективных исследований. ЭПР-дозиметрия может также стать инструмент экспертизы для подтверждения факта облучения при отсутствии/утере юридически значимых документов.

Доклад был представлен на Всероссийской конференции «Биосферная совместимость атомной энергетики» 1 марта 2022 г. (Екатеринбург, Россия).

Ключевые слова: электронный парамагнитный резонанс; дозиметрия.

ЭПР-дозиметрия как средство восстановления доз облучения людей при неконтролируемых радиационных ситуациях

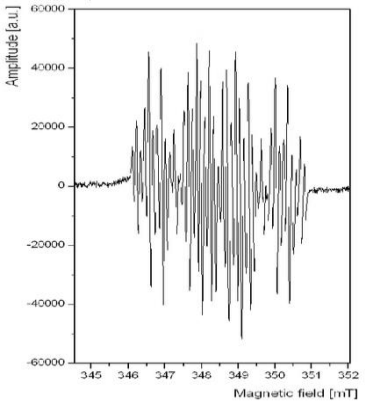
д.б.н. Шишкина Е. А.

ФГБУН Уральский Научно-Практический Центр Радиационной Медицины

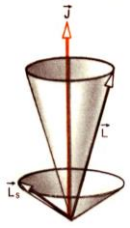
Слайд 1

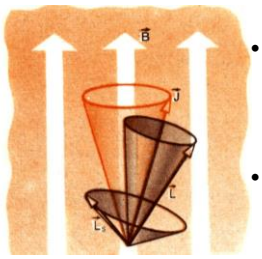
ЭПР-спектроскопия

- Электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) – резонансное поглощение электромагнитного излучения неспаренными электронами (открыт Е. К. Завойским, 1944).
- Метод однозначно различает примесные ионы, изоморфно входящие в кристаллическую решетку, а также органические свободные радикалы и позволяет получить детальные сведения о ионе в структуре окружающих атомов и молекул (валентность, гибридизация электронов, химические связи и т. д.)



Спектр свободных радикалов крови человека (Krzyminiewski et al., 2011)





- На возможность детектировать ЭПР-спектры свободных радикалов, возникающих в биологических тканях под действием ионизирующего излучения, впервые было обращено внимание в *(Gordy et al. 1955)*. При облучении челюстной кости был обнаружен стабильный радиационно-индуцированный сигнал.
- В СССР пионерами применения ЭПР в радиобиологических исследованиях были Л. А. Блюменфельд и А. Э. Калмансон, которые изучали свободные радикалы, возникающие в белках под действием ионизирующего излучения (*Блюменфельд и Калмансон, 1959)*.

Слайд 2

Поиск материалов для реконструкции доз облучения методом ЭПР

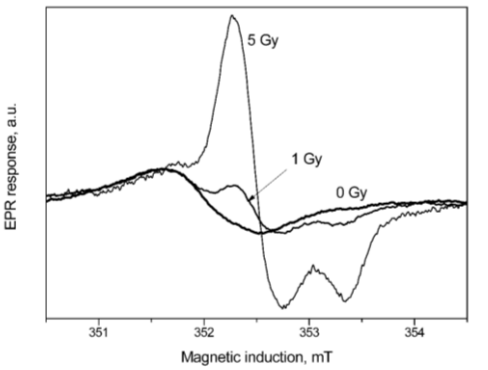
- Стабильность радиационно-индуцированных радикалов – главное условие выбора дозиметра при восстановлении доз облучения *post factum* (при неконтролируемых радиационных ситуациях).
- Тестировались различные материалы:

- фармпрепараты, кожаные изделия; табак; банковские карты; керамика, целлюлоза; полипропилен; ногти, волосы, различный текстиль; раковины моллюсков и перламутровые пуговицы; часовые камни; резиновые изделия; сахар; скорлупа яиц, пищевые продукты и даже живые крысы и рыбы (*Blouin and Arthur, 1958; Swartz, 1965; Iwasaki et al., 1967; Dziedziela and Rosiak, 1977; Delides et al., 1981; Nakajima, 1982; Ikeya et al., 1984; Chandra and Symons, 1987; Dodd et al., 1988; Regula and Deffner, 1989; Dalgarno et al., 1989; Barthe et al., 1989, Raffi et al., 1989; Wieser et al., 1991 …*);

- и кальцифицированные ткани человека (*Stachowicz et al., 1974; Ostrowski et al., 1980; Schwarcz, 1982; Ikeya, 1980, 1986, 1989 ; Hoshi et al., 1985; Tatsumi and Okajima, 1985 ; Callens et al., 1987, Wieser et al., 1994…*)

Слайд 3

ЭПР-дозиметрия эмали зубов



- Под действием ионизирующего излучения в гидроксиапатите кальция ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) образуется стабильный ионный комплекс CO_2^-. Время жизни в экстрагированных тканях порядка $10^5 – 10^9$ лет
- Широко используется в археологии для датирования.
- **Эмаль зубов** – единственная биологическая ткань, где отсутствуют живые клетки. Она на 98 % состоит из кристаллов гидроксиапатита кальция ($Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$).

Слайд 4

Для чего разрабатывались методы ЭПР-дозиметрии на эмали зубов?

1) **дозиметрия экстренного реагирования** *(*для быстрого принятия медицинских и социальных мер): разработка скрининговых методов измерения молочных зубов и измерений постоянных зубов *in vivo;*

2) **ретроспективная дозиметрия для восстановления картины происшествия** при расследованиях радиационных инцидентов (предполагает сбор и систематизацию доступного биоматериала в процессе ликвидации последствий и проведения первичной медицинской помощи);

3) **ретроспективная дозиметрия для поддержки эпидемиологических исследований**

Слайд 5

ЭПР-дозиметрия зубов *in vivo*

- Первые исследования проводились в 1960-х годах (*Brady et al., 1968*), однако аппаратурные ограничения в то время не позволяли измерять дозы менее 5 Гр (для медицинской сортировки требуются надежные измерения по крайней мере от 2 Гр)
- В 2007 г. исследовательская группа Гарольда Шварца (ЭПР-центр Дартмундской медицинской школы) объявила о создании прибора, измеряющего дозу от 2 Гр с погрешностью 25 % за 5 мин. Однако он был громоздким, нетранспортабельным и крайне некомфортным для пациента.

Стационарный in vivo ЭПР-спектрометр (*Shwartz et al., 2007)*

- Настоящим прорывом стал прибор с аналогичными измерительными возможностями, но лишенный названных недостатков.

Перевозной ЭПР-спектрометр *in vivo*

(Williams et al., 2014, Umakoshi et al., 2017)

Слайд 6

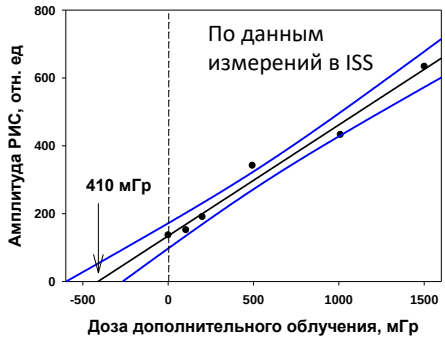
Ретроспективная дозиметрия эмали удаленных зубов: проблемы

- Ограниченная доступность биоматериала: образцы для исследований могут быть получены при удалении зубов по медицинским показаниям.
- Дороговизна: высокая стоимость спектрометра, специальные требования к помещению, дополнительное оборудование для приготовления образцов, расходные материалы, техническая поддержка, калибровка и т. д.
- Отсутствие метрологического стандарта.

Слайд 7

Как решить проблему отсутствия метрологического стандарта?

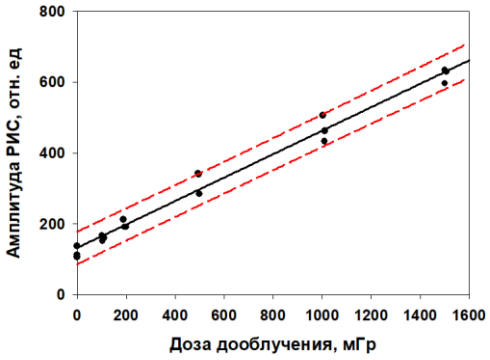
Вариант 1: Индивидуальная калибровка не решает проблемы



Метод дополнительного облучения

D= 410 мГр, 90 % ДИ: 260–600 мГр

Стохастическая погрешность ~ 26 %



Калибровочная кривая

Стохастическая погрешность для доз ~ 400 мГр – **20 %**

Слайд 8

Как решить проблему отсутствия метрологического стандарта?

Вариант 2: Межлабораторные сравнения не решает проблемы, но позволяет оценить возможную неисключенную систематическую ошибку (*ad maximum*)

- Около 20 лабораторий мира имеют протоколы ЭПР измерений эмали зубов и участвуют в международных интеркалибровках.
- Сравнение, проводившееся в 2014 г., показало, что дозовые оценки совпадают в пределах 200 мГр, что является верхней границей возможной неисключенной систематической ошибки.
- Следует отметить, что из 20 лабораторий половина активно использует ЭПР-дозиметрию для ретроспективного исследования конкретных радиационных ситуаций.

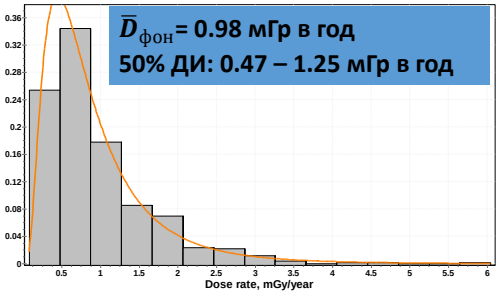
Слайд 9

Как решить проблему отсутствия метрологического стандарта?

Вариант 3: Использование распределения доз от естественного радиационного фона в качестве заменителя референтного образца

$$\widehat{D} = LogNorm[m, c] + Norm[C, \sigma]$$

- **Результат измерения**
- **«ИСТИННАЯ» фоновая доза**
- **Ошибка измерения (случайная и систематическая)**



Диапазон систематических ошибок (14 методов)

Премоляры и моляры (9 методов): -60 – 130 мГр
Резцы, фронтальная поверхность (3 метода): 250 – 350 мГр
Резцы, язычная поверхность (3 метода): 130 – 320 мГр

[*Shishkina et al., Radiat Environ Biophys, 2016*]

Слайд 10

Ретроспективная ЭПР-дозиметрия

- Исследования переживших ядерные бомбардировки в Хиросиме [*Ikeya et al., 1984*] – 100 человек.
- 200 работников ПО «Маяк» [*Wieser et al., 2006*];
- 100 человек, проживавших вблизи Семипалатинского ядерного полигона (Казахстан) [*Sholom et al., 2007*];
- ~ 30 человек, проживающих вблизи Степногорского ГОК [*Zhumadilov et al., 2015*];
- 10 человек с симптомами острой лучевой болезни из персонала атомных подводных лодок [*Sevan'kaev et al., 2006*];
- ~10 свидетелей войсковых учений с испытанием атомного оружия на Тоцком полигоне в 1954 г. [*Romanyukha et al., 2000*];
- ~10 выживших в радиационном инциденте Гоянии (Бразилия) в 1987 г. [*Rossi et al., 2000*].

Самые масштабные исследования:

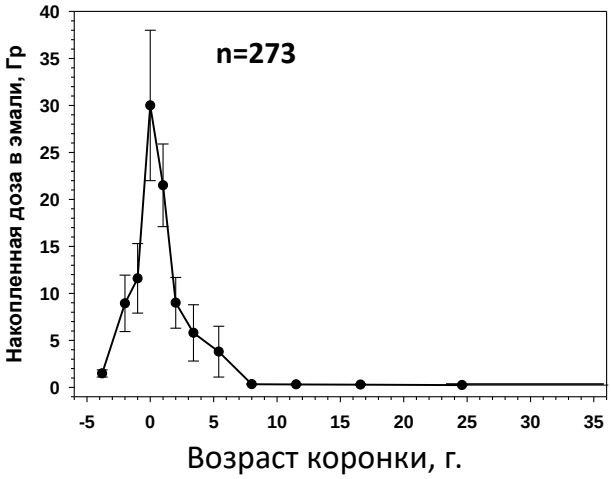
- ~1 000 жителей территорий Украины, загрязненных в результате аварии на Чернобыльской АЭС [*Serezhenkov et al., 1992; Ivannikov et al, 1997; Bugay et al., 1999*];

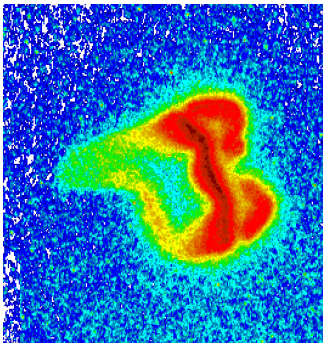
- ~ 660 украинских и ~ 100 российских ликвидаторов Чернобыльской аварии [*Chumak et al., 2005; Sevan'kaev et al., 2006*];

- 630 измерений зубов 430-ти жителей Уральского региона, проживавших на радиационно загрязненных территориях (и 170 необлученных людей – контроль) [*Shishkina et al., 2019*].

Слайд 11

Зависимость дозы от уровня накопления ^{90}Sr в тканях зубов





Цифровая авторадиография 1-го моляра жителя Муслюмово 1950 г. р.

$T_{поступление}$ для жителей прибрежных территорий р. Течи принято однократным (сентябрь 1950)

[*Shishkina et al., Rad Meas, 2011*]

Слайд 12

Доза внешнего техногенного облучения в эмали зубов

$$D_{External} = D_{EPR} - D_{Background} - D_{Internal} - D_{Medical}$$

ЭПР-измерения индивидуальной накопленной дозы в эмали зубов

ЭПР-измерения

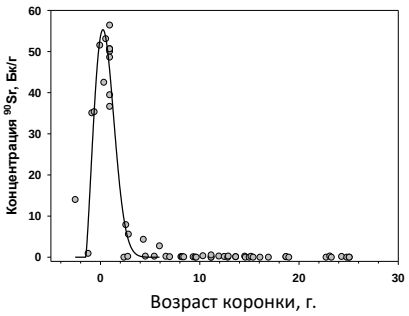
Медицинские обследования зубов учитывались

Измерения удельной активности ^{90}Sr в тканях 219 зубов 134 жителей загрязненных территорий; **одонтометрия** 882 зубов; **ЭПР-измерения** порядка 100 зубов с высоким содержанием ^{90}Sr

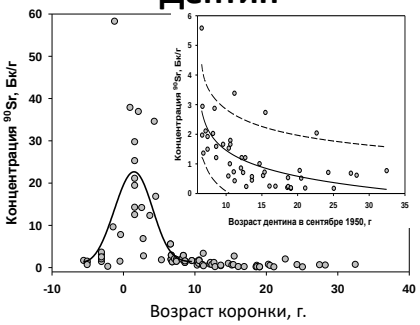
Слайд 13

Содержание ^{90}Sr в зубных тканях спустя 60 лет после поступления

Эмаль



Дентин



В пересчете на единичное поступление радионуклида с пищей и водой у зубов старше 6 лет концентрация ^{90}Sr:

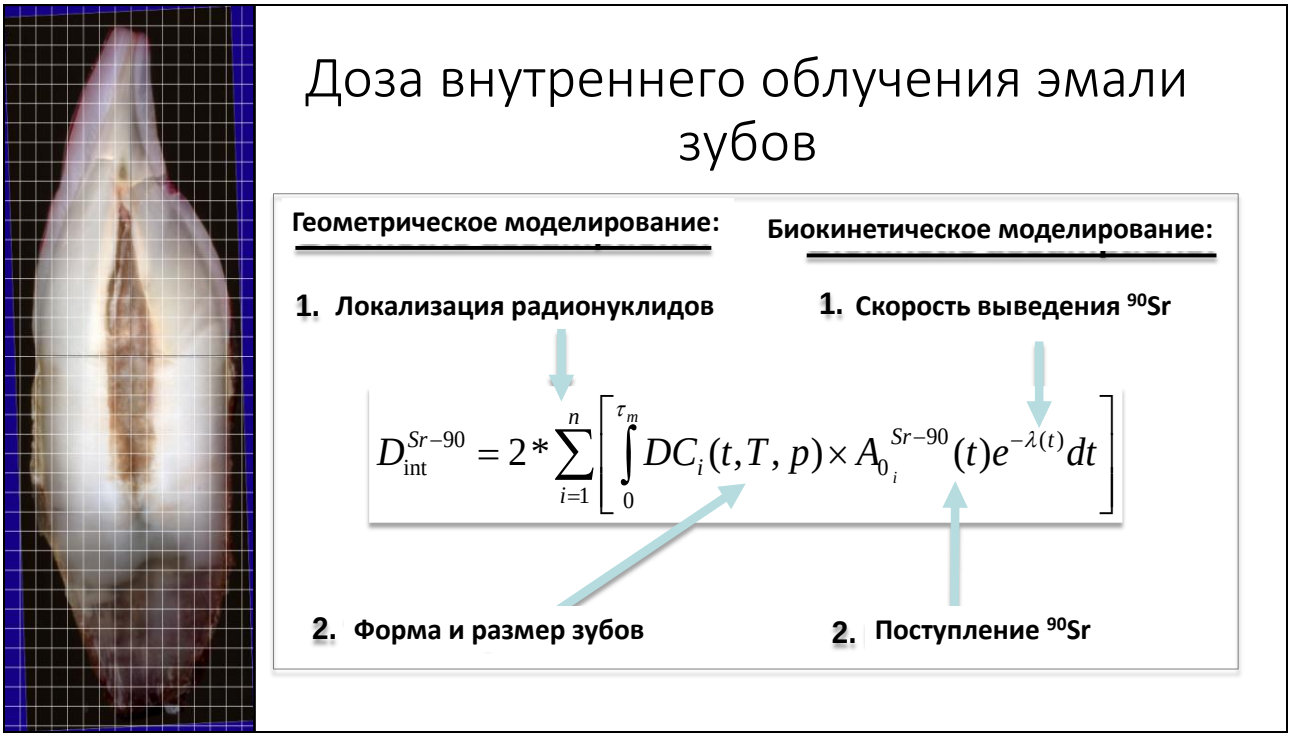
$1{,}7 \cdot 10^{-4}$ Бк г$^{-1}$/ Бк

от 6 до 66 лет снижается с $1{,}1 \cdot 10^{-2}$ до $1{,}8 \cdot 10^{-4}$ Бк г$^{-1}$/ Бк.

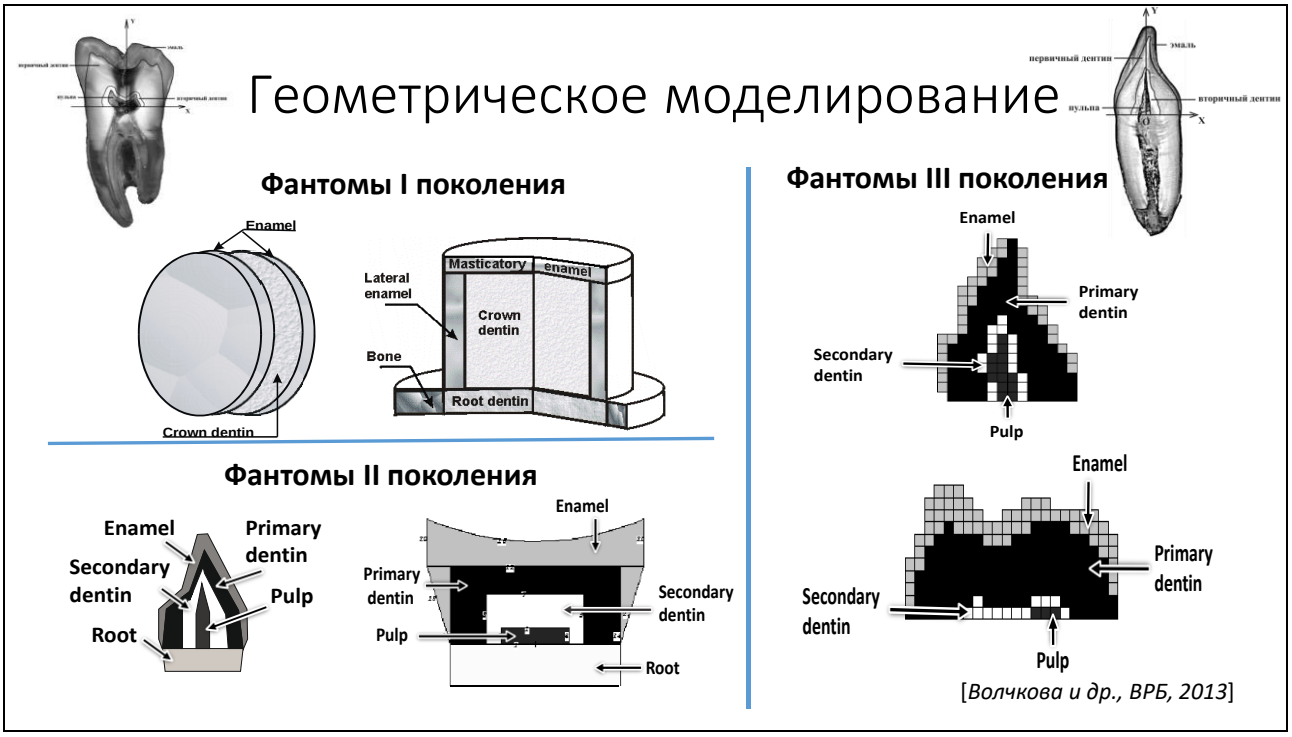
Только зубы, чья коронка была старше 6 лет на момент максимальных сбросов, в дальнейшем были использованы для оценок доз внешнего облучения.

[*Shishkina et al., Radiat Environ Biophys, 2014*]

Слайд 14

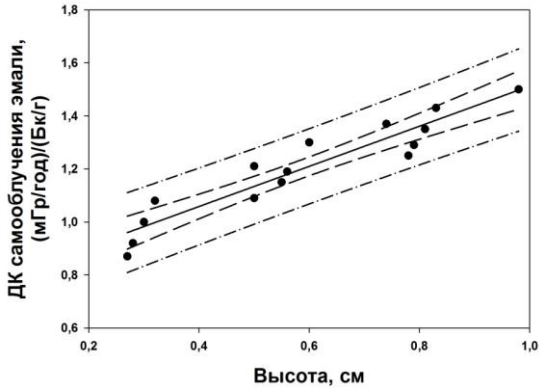


Слайд 15

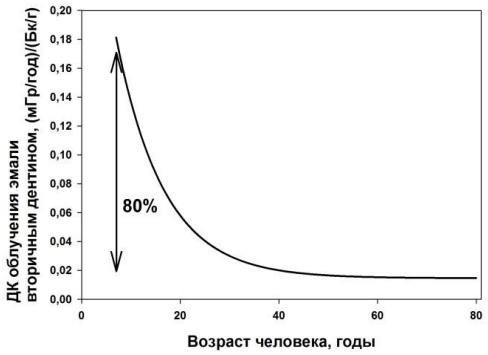


Слайд 16

Зависимость дозовых коэффициентов от возраста



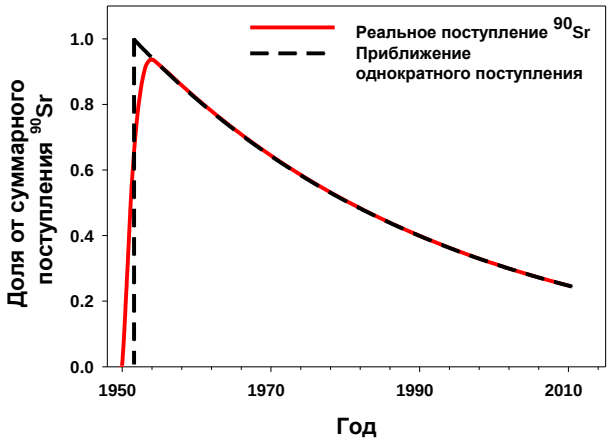
Зависимость дозовых коэффициентов самооблучения эмали 1-го нижнего резца от высоты коронки



Зависимость дозовых коэффициентов облучения эмали 1-го нижнего моляра вторичным дентином

Слайд 17

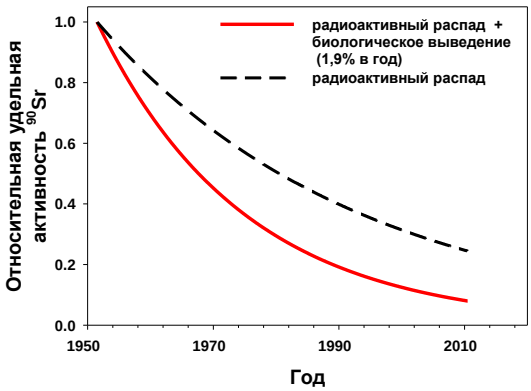
Приближение однократного поступления



Приближение однократного поступления приемлемо и дает ошибку ~ 0,2 %

Слайд 18

Стирание зубов или биологическое выведение?



Разница между расчетами с учетом биологического выведения и без – 30 %

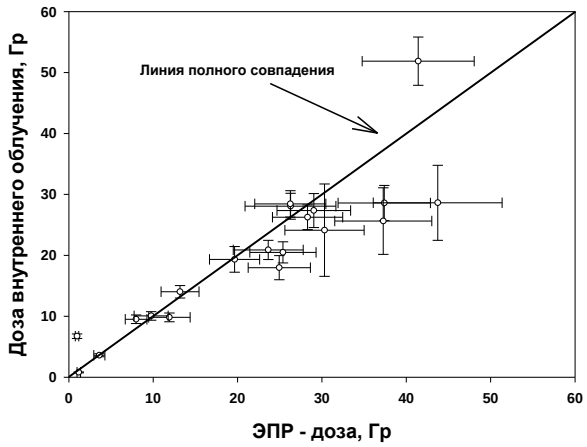
Многолетний мониторинг содержания ^{90}Sr в эмали показал, что потеря активности – 1,9 % в год [*Tolstykh et al., Radiat Environ Biophys, 2000*]

Анализ одонтометрических измерений и построенные на его основе фантомы позволили рассчитать скорость потери объема эмали – 1,8 ± 0,4 % в год [*Волчкова и Шишкина, Вестник ЧелГУ, 2013*].

Удельная активность эмали – постоянна, возрастные изменения размеров зубов учитываются в дозовых коэффициентах.

Слайд 19

Проверка модельных расчетов доз внутреннего облучения



Сопоставление расчетных значений дозы внутреннего облучения в эмали от инкорпорированного ^{90}Sr с измеренными значениями ЭПР-дозы.

R^2=0,85; p < 0,0001

Слайд 20

Неопределенность оценки доз внешнего облучения по данным ЭПР

- погрешность ЭПР-измерения;
- индивидуальная вариабельность радиационной чувствительности зубной эмали;
- неопределенность оценки средней фоновой дозы;
- индивидуальная вариабельность фоновых доз;
- неопределенность оценок медицинских доз;
- неопределенность расчетов доз внутреннего облучения за счет инкорпорированных изотопов Sr.

Слайд 21

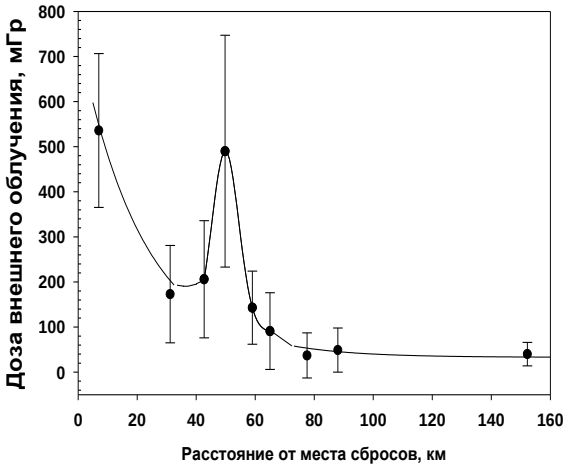
Дозы внешнего облучения, полученные на основе ЭПР-измерений эмали, сформированной к моменту сбросов

Диапазон доз, мГр	N человек	Доля от общего количества измерений, %	Средняя относительная стандартная неопределенность, %
< 50	159	61	350
50–100	28	11	200
100–300	30	12	70
300–500	17	7	40
500– 1000	16	6	30
>1000	9	3	20

[*Shishkina et al., Ratiat. Protect. Dosimetry, 2019*]

Слайд 22

Дозы внешнего облучения, восстановленные по ЭПР-измерениям

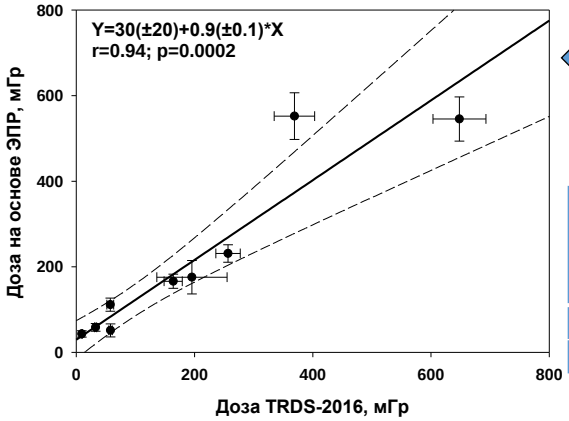


- Зависимость доз внешнего облучения от расстояния от места исторических сбросов.
- Максимальные индивидуальные дозы были обнаружены в Метлино (1.9 Gy) и в Надырово (2.2 Gy).

[*Shishkina et al., Rad Envir Biophys, 2016*]

Слайд 23

Валидация доз внешнего облучения, предсказываемых TRDS2016-D



для жителей прибрежных территорий р. Течи N=223;

для жителей ВУРСа

	Начальное загрязнение по ^{90}Sr, Ки км$^{-2}$	Сроки эвакуации, дни	N	$D_{ЭПР}$, мГр	TRDS-2016D, мГр
1	400 –650	7–14	10	180 ± 70	177 ± 5
2	4–65	250–330	26	70 ± 30	34 ± 20

[*Shishkina et al., Rad Envir Biophys, 2016; Дегтева и др., Радиац. биология. Радиоэкология, 2017*]

Слайд 24

Кроме того, в пользу достоверности TRDS:

- Термолюминесцентные измерения кирпичей прибрежных строений в Метлино и Муслюмово [*Woda et al., 2011, 2023; Hiller et al., 2017, 2022*]
- Биодозиметрия на основе флуоресцентной *in situ* гибридизации (FISH) – 71 житель верховьев [*Дегтева и др., 2017*]

Сопоставление техногенных доз (за вычетом вклада ^{90}Sr)

Расстояние от места сбросов, км	ЭПР		FISH	
	Количество зубов/человек	Доза, мГр	Количество ГЭ клеток·10^3/человек	Доза, мГр
7	25/11	**547 ± 170**	22,1/23	**510 ± 70**
18–45	46/24	**220 ± 80**	9,4/13	**390 ± 100**
48–50	25/10	**570 ± 250**	9,2/12	**480 ± 120**
54–70	85/34	**160 ± 60**	16,2/23	**130 ± 80**

Слайд 25

Заключение

- Ретроспективная система оценок доз населения – TRDS-2016 уникальна, поскольку является хорошо валидированой, что в целом не типично для неконтролируемых радиационных ситуаций.
- ЭПР-дозиметрия может стать инструментом подтверждения факта облучения при отсутствии/утере юридически значимых документов.
- В ситуациях, сопровождающихся поступлением ^{90}Sr в организм, наличие стронция в тканях зубов также может служить подтверждением факта проживания на радиационно загрязненных территориях.

Слайд 26

Благодарность

Эта работа была бы невозможна без совместных усилий коллектива биофизической лаборатории УНПЦ РМ и коллективов российских и зарубежных ученых.

ЭПР измерения:
Институт физики металлов УрО РАН (Екатеринбург)
Helmholtz Centrum Munich (Мюнхен, Германия)
Istituto Superiore di Sanità (Рим, Италия)
Медицинский радиологический научный центр (Обнинск)
Институт физической химии (Москва)
Институт биофизики (Москва)

Измерения удельной активности ^{90}Sr :
Helmholtz Centrum Munich
Milano University (Милан, Италия)
Медицинский радиологический научный центр (Обнинск)

Слайд 27

Список литературы

1. Dose evaluation from textile fibers: a post-determination of initial ESR signal/ J. Barthe, V. Kamenopoulou, B. Cattoire, G. Portal// International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes. – 1989. – Vol. 40, № 10–12. – P. 1029–1033. – DOI 10.1016/0883-2889(89)90036-1
2. *Blouin, F. A.* The Effects of Gamma Radiation on Cotton: Part I: Some of the Properties of Purified Cotton Irradiated in Oxygen and Nitrogen Atmospheres/ F. A. Blouin , J. C. Arthur // Textile Research Journal. – 1958. – Vol. 28, № 3. – P. 198–204. – DOI 10.1177/004051755802800302. – EDN JQIWBD.
3. *Brady, J. M.* In vivo dosimetry by electron spin resonance spectroscopy/ J. M. Brady, N. O. Aarestad, H. M. Swartz // Health Phys. – 1968. – Vol. 15. – P. 43–47. – DOI 10.1097/00004032-196807000-00007.
4. EPR spectroscopy of radiation-induced centers in tooth enamel and its application for retrospective dosimetry in Chernobyl case/ O. Bugay, V. Bartchuk, S. Kolesnik, V. Maksimenko // Appl. Magn. Reson. – 1999. – Vol. 16. – P. 317–323. – DOI 10.1007/BF03161921. – EDN XJWGHH.
5. The contribution of CO3(3-) and CO2- to the ESR spectrum near g = 2 of powdered human tooth enamel / F. J. Callens, R. M. Verbeeck, P. F. Matthys [et al.] // Calcif Tissue Int. – 1987. – Vol. 41, № 3. – P. 124–129. – DOI 10.1007/BF02563791. – EDN QMMTBZ.
6. *Chandra, H.* Sulphur radicals formed by cutting alpha-keratin/ H. Chandra, M. C. R. Symons // Nature. – 1987. – Vol. 328. – P. 833–834. – DOI 10.1038/328833a0.
7. High precision EPR dosimetry as a reference tool for validation of other techniques / V. V. Chumak, S. V. Sholom, E. V. Bakhanova [et al.] // Appl Radiat Isot. – 2005. – Vol. 62, № 2 SPEC. ISS. – P. 141-146. – DOI 10.1016/j.apradiso.2004.08.029. – EDN XJRNVB.
8. *Dalgarno, B. G.* Evaluation of ESR as a radiation accident dosimetry technique/ B. G. Dalgarno, J. D. Mcclymont // International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes. – 1989. – Vol. 40, № 10–12. – P. 1013–1020. – DOI 10.1016/0883-2889(89)90034-8.
9. *Delides, C. G.* The degradation of cotton by ionizing radiation/ C. G. Delides, C. Z. Panagiotalidis, O. C. Lega-Panagiotalidis // Textile Res. J. – 1981. – Vol. 51, № 5. – P. 311–317. – DOI 10.1177/004051758105100501. – EDN JTUNLH.
10. *Dodd, N. J.* ESR detection of irradiated food / N. J. Dodd, J. S. Lea, A. J. Swallow // Nature. – 1988. – Vol. 334, № 6181. – P. 387. – DOI 10.1038/334387a0.
11. *Dziedziela, W. M.* Some aspects of radiation-induced transformations of cellulose / W. M. Dziedziela, J. Rosiak // In: Hedvig, P., Schiller, R. (Eds.), Proc. of the Fourth Tihany Symp. on Rad. Chem. – Budapest: Akademia Kiado, 1977. – P. 439.
12. *Gordy, W.* Microwave spectroscopy of biological substances. II. Paramagnetic resonance in X-irradiated carboxylic and hydroxy acids / W. Gordy, W. B. Ard, H. Shields // Proc Natl Acad Sci USA. – 1955. – Vol 41, № 11. – P. 996–1004. – DOI 10.1073/pnas.41.11.996.
13. External dose reconstruction at the shore of the Metlinsky Pond in the former village of Metlino (Techa River, Russia) based on environmental surveys, luminescence measurements and radiation transport modelling/ M. Hiller, C. Woda, M. Degteva [et al.] // Radiation and Environmental Biophysics. – 2022. – Vol. 61, № 1. – P. 87-109. – DOI: 10.1007/s00411-021-00953-3. – EDN RXOQNC.
14. External dose reconstruction for the former village of Metlino (Techa River, Russia) based on environmental surveys, luminescence measurements and radiation transport modelling / M. M. Hiller, C. Woda, N. G. Bougrov [et al.] // Radiat Environ Biophys. – 2017. – Vol. 56, № 2. – P. 139–159. – DOI 10.1007/s00411-017-0688-3. – EDN YVUJZP.
15. ESR dosimetry for A-bomb survivors/ M. Hoshi, S. Sawada, M. Ikeya, T. Miki // In ESR Dating and Dosimetry – Tokyo: IONICS, 1985. – P. 407.
16. *Ikeya, M.* Atomic bomb and accident dosimetry with ESR: natural rocks and human tooth in-vivo spectrometer / M. Ikeya, H. Ishii // Int J Rad Appl Instrum A. – 1989. Vol. 40, № 10–12. – P. 1021–1027. – DOI 10.1016/0883-2889(89)90035-x.
17. *Ikeya, M.* Electron spin resonance dating of animal and human bones / M. Ikeya, T. Miki // Science – 1980. – Vol. 207, № 4434. – P. 977–979. – DOI 10.1126/science.207.4434.977.
18. ESR dosimetry of A-bomb radiation using tooth enamel and granite rocks / M. Ikeya, A. Kai, T. Miki, M. Hoshi // Radiat. Prot. Dosim. – 1986. – V. 17, № 1–4. – P. 181 – 184. – DOI 10.1093/rpd/17.1-4.181.

19. *Ikeya, M.* ESR Dosimetry for Atomic Bomb Survivors Using Shell Butons, and Tooth Enamel / M. Ikeya, J. Miyajima, S. Okajima // Japanese Journal of Applied Physics. – 1984. – Vol. 23. – Part 2. – № 9. – P. 679-710. – DOI 10.1143/JJAP.23.L697.
20. Wide Scale EPR Retrospective Dosimetry: Results and Problems / A. A. Ivannikov, V. G. Skvortzov, V. F. Stepanenko [et al.] // Radiation Protection Dosimetry. – 1997. – Vol. 71, № 3. – P. 175–180. – DOI 10.1093/oxfordjournals.rpd.a032049. – EDN LEMTKD.
21. *Iwasaki, M.* Photo-induced and thermal radical conversions in g-irradiated copolymers of tetrafluoroethylene and hexafluoropropylene as studied by electron spin resonance/ M. Iwasaki, K. Toriyama // J. Chem. Phys. – 1967. – Vol. 47, № 2. – P. 559-563. – DOI. 10.1063/1.1711931.
22. EPR Study of Iron Ion Complexes in Human Blood / R. Krzyminiewski, Z. Kruczyński, B. Dobosz [et al.] // Appl Magn Reson. – 2011. – Vol. 40, № 3. – P. 321–330. – DOI 10.1007/s00723-011-0219-3. – EDN VHREYS.
23. *Nakajima, T.* The use of organic substances as emergency dosimeters / T. Nakajima // Int. J. Appl. Radiat. Isot. – 1982. – Vol. 33, № 11. – P. 1077–1084. – DOI 10.1016/0020-708X(82)90236-8.
24. *Ostrowski, K.* Stable radiation-induced paramagnetic entities in tissue mineral and their use in calcified tissue research / K. Ostrowski, A. Dziedzic-Goclawska, W. Stachowicz // In W. Pryor (Eds) Free Radicals in Biology. – 1980. – Vol. 4. – New York: Academic Press. – P. 321–344. – DOI 10.1016/B978-0-12-566504-9.50017-9.
25. ESR analysis of irradiated frogs' legs and fishes/ J. Raffi, J. C. Evans, J. P. Agnel [et al.] // Int J Rad Appl Instrum A. – 1989. – Vol. 40, № 10–12. – P. 1215–1218. – DOI. 10.1016/0883-2889(89)90066-x.
26. *Regulla, D. F.* Dose estimation by ESR spectroscopy at a fatal radiation accident/ D. F. Regulla, U. Deffner// Appl. Radiat. Isot. – 1989. – V. 40. – № 10–12. – P. 1039-1043. – DOI 10.1016/0883-2889(89)90038-5
27. Electron spin resonance dosimetry of teeth of Goiânia radiation accident victims/ A. M. Rossi, C. C. Wafcheck, E. F. de Jesus, F. Pelegrini // Appl Radiat Isot. – 2000. – Vol. 52, № 5. – P. 1297–303. – DOI 10.1016/s0969-8043(00)00087-7.
28. *Schwarcz, H. P.* ESR studies of tooth enamel / H. P. Schwarcz // Nuclear Tracks and Radiation Measurements. – 1982. – Vol. 10, № 4–6. – P. 865–867. – DOI 10.1016/0735-245x(85)90101-2.
29. Radiation Dosimetry for Residents of the Chernobyl Region: A Comparison of Cytogenetic and Electron Spin Resonance Methods / V. A. Serezhenkov, E. V. Domracheva, G. A. Klevezal [et al.] // Radiation Protection Dosimetry. – 1992. – Vol. 42, № 1. – P. 33–36. – DOI 10.1093/oxfordjournals.rpd.a081274. – EDN UODPPR.
30. The suitability of FISH chromosome painting and ESR-spectroscopy of tooth enamel assays for retrospective dose reconstruction / A. Sevan'kaev, I. Khvostunov, D. Lloyd [et al.] // J Radiat Res. – 2006. – Vol. 47, №. Suppl A. – P. 75–80. - DOI 10.1269/jrr.47.a75. – EDN LJZCHZ.
31. Extra high doses detected in the enamel of human teeth in the Techa riverside region / E. A. Shishkina, M. O. Degteva, E. I. Tolstykh [et al.] // Radiat Meas. – 2011. – Vol. 46, № 760–764. – DOI 10.1016/j.radmeas.2011.03.034. – EDN PEASSJ.
32. Concentrations of 90Sr in the tooth tissues 60 years after intake: results of TL measurements and applications for Techa River dosimetry / E. A. Shishkina, E. I. Tolstykh, E. Verdi [et al.] // Radiat Environ Biophys. – 2014. – Vol. 53, № 1. – P. 159–173. – DOI 10.1007/s00411-013-0501-x. – EDN UFPTXH
33. Application of EPR tooth dosimetry for validation of the calculated external doses: Experience in dosimetry for the Techa River Cohort / E. A. Shishkina, A. Y. Volchkova, D. V. Ivanov [et al.] // Radiat Prot Dosim. – 2019. – Vol. 186, № 1. – P. 70–77. – DOI 10.1093/rpd/ncy258. – EDN IXCBJX.
34. External dose reconstruction in tooth enamel of Techa riverside residents / E. A. Shishkina, A. Y. Volchkova, Y. S. Timofeev [et al.] // Radiat Environ Biophys. – 2016. – Vol. 55, № 4. – P. 477–499. – DOI 10.1007/s00411-016-0666-1. – EDN WLQIXT.
35. EPR tooth dosimetry of SNTS area inhabitants / S. Sholom, M. Desrosiers, A. Bouville [et al.] // Radiat Meas. – 2007. – Vol. 42, № 6. – P. 1037–1040. – DOI 10.1016/j.radmeas.2007.05.007. – EDN MMAVYP.
36. Evaluation of absorbed dose of gamma and X-ray radiation using bone tissue as a dosemeter / W. Stachowicz, J. Michalik, A. Dziedzic-Goclavska, R. Ostrowski // Nucleonica – 1974. – Vol. 19. – P. 845–850.

37. *Swartz, H. M.* Electron spin resonance spectra of some normal tissues: Effect of microwave power/ H. M. Swartz, R. P. Molenda // Science. – 1965. – Vol. 148, № 3666. – P. 94–95. – DOI 10.1126/science.148.3666.94.b.
38. In vivo EPR for dosimetry/ H. M. Swartz, G. Burke, M. Coey [et al.] // Radiation Measurements. – 2007. – Vol. 42, № 6–7. – P. 1075–1084. – DOI 10.1016/j.radmeas.2007.05.023. – EDN MMAVXL.
39. *Tatsumi J. M.* ESR dosimetry using human tooth enamel/ J. M. Tatsumi, S. Okajima // In ESR Dating and Dosimetry. – 1985. – Tokyo: IONICS. – P. 397.
40. Strontium metabolism in teeth and enamel dose assessment: Analysis of the Techa River data / E. I. Tolstykh, M. O. Degteva, V. P. Kozheurov [et al.] // Radiat Environ Biophys. – 2000. – Vol. 39, № 3. – P. 161–171. – DOI 10.1007/s004110000059. – EDN LFZVJD.
41. In Vivo Electron Paramagnetic Resonance Tooth Dosimetry: Dependence of Radiation-Induced Signal Amplitude on the Enamel Thickness and Surface Area of Ex Vivo Human Teeth / M. Umakoshi, I. Yamaguchi, H. Hirata [et al.]// Health Phys. – 2017. – Vol. 113, № 4. – P. 262–270. – DOI 10.1097/HP.0000000000000698. – EDN YHRIAZ.
42. EPR dosimetry of bone gains accuracy by isolation of calcified tissue / A. Wieser, E. Haskell, G. Kenner, F. Bruenger // Appl Radiat Isot. – 1994. – Vol. 45, № 4. – P. 525–526. – DOI 10.1016/0969-8043(94)90119-8.
43. Comparison of EPR occupational lifetime external dose assessments for Mayak nuclear workers and film badge dose data / A. Wieser, E. Vasilenko, P. Fattibene [et al.] // Radiat Environ Biophys. – 2006. – Vol. 44, № 4. – P. 279–288. – DOI 10.1007/s00411-005-0024-1. – EDN LJUKJP.
44. Unexpected superlinear dose dependence of the E′1 centre in fused silica / A. Wieser, Y. Göksu, D. R. Regulla, A. Waibel // International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements. – 1991. – Vol. 18, № 1–2. – P. 175–178. – DOI:10.1016/1359-0189(91)90109-u.
45. In vivo EPR tooth dosimetry for triage after a radiation event involving large populations / B. B. Williams, A. B. Flood, I. Salikhov [et al.] // Radiat Environ Biophys. – 2014. – Vol. 53, № 2. – P. 335–346. – DOI 10.1007/s00411-014-0534-9. – EDN YFFBQX.
46. Luminescence dosimetry in a contaminated settlement of the Techa River valley, Southern Urals, Russia / C. Woda, A. Ulanovsky, N. G. Bougrov [et al.] // Radiat Meas. – 2011. – Vol. 46, № 3. – P. 277–285. – DOI 10.1016/j.radmeas.2010.06.028. – EDN OHZRZ.
47. Luminescence dosimetry for evaluation of the external exposure in Metlino, upper Techa River valley, Southern Urals, Russia: Analysis of new results / C. Woda, M. Hiller, J. A. Ademola [et al.] // Applied Radiation and Isotopes. – 2023. – Vol. 193. – P. 110618. – DOI 10.1016/j.apradiso.2022.110618. – EDN HANYLZ.
48. EPR pilot study on the population of Stepnogorsk city living in the vicinity of a uranium processing plant / K. Zhumadilov, A. Ivannikov, V. Stepanenko [et al.] // Radiat Environ Biophys. – 2015. – Vol. 54, № 1. – P. 145–149. – DOI 10.1007/s00411-014-0573-2. – EDN TVNTAR.
49. *Блюменфельд, Л. А.* Действие ионизирующего излучения на сухие препараты аминокислот, пептидов, белков и лиофилизированных тканей / Л. А. Блюменфельд, А. Э. Калмансон // Биофизика. – 1957. – Т.2, № 5. – С. 552–565.
50. *Волчкова, А. Ю.* Размеры резцов сельских жителей Урала / А. Ю. Волчкова, Е. А. Шишкина // Вестник Челябинского государственного университета. – 2013, № 7. – С. 112–114. – EDN PYWJTZ.
51. Использование методов EPR и FISH для реконструкции дозы облучения людей в районе реки Теча / М. О. Дегтева, Е. А. Шишкина, Е. И. Толстых [и др.] // Радиат. Биол. Радиоэкол. – 2017. – Т. 57, № 1. – Р. 30–41. – DOI 10.7868/S0869803117010052. – EDN YIVYRZ.
52. *Завойский, Е. К.* Новый метод исследования парамагнитной абсорбции / Е. К.Завойский, С. А. Альтшулер, Б. М. Козырев // ЖЭТФ. – 1944. – Т.14, №10–11. – С. 407–409.
53. *Романюха, А. А.* Опыт ЭПР-реконструкции индивидуальных доз, поглощенных населением в зоне влияния Тоцкого ядерного взрыва / А. А. Романюха, Д. В. Иванов., А. Г. Васильев // Проблемы отдаленных эколого-генетических последствий радиационных инцидентов: Тоцкий ядерный взрыв: материалы Межрегион. науч. конф., 30 окт. – 2 нояб. 2000 г. / Рос. акад. наук, Урал. отд-ние, Ин-т экологии растений и животных; [отв. ред., авт. предисл. д-р биол. наук А. Г. Васильев]. – Екатеринбург : Екатеринбург, 2000. – С .100–106.

Сведения об авторах

Шишкина Елена Анатольевна, д. б. н., и. о. зав. биофиз. лаб. ФГБУН УНПЦ РМ ФМБА России; доцент кафедры радиобиологии Челябинского государственного университета, г. Челябинск, Россия. Эл. почта: lena@urcrm.ru

EPR DOSIMETRY AS A METHOD FOR HUMAN RADIATION DOSE RECONSTRUCTION AFTER UNCONTROLLED RADIATION SITUATIONS

Shishkina E.A.

Urals Research Center for Radiation Medicine, Chelyabinsk

Electron paramagnetic resonance (EPR) is the resonance absorption of electromagnetic radiation by unpaired electrons. The method clearly distinguishes impurity ions isomorphically included in the crystal lattice, as well as organic free radicals, and allows obtaining detailed information about the ion in the structure of surrounding atoms and molecules (valence, electron hybridization, chemical bonds, etc.). The ability to measure radiation-induced radicals by the EPR method is the basis of EPR dosimetry. The stability of radiation-induced radicals is the main condition for choosing a dosimeter when restoring radiation doses post factum (after uncontrolled radiation situations). Today, EPR dosimetry methods are being developed both for emergency response to radiation incidents and for retrospective dose assessments.

Calcified tissues and, in particular, tooth enamel turned out to be one of the most reliable biological EPR dosimeters. The method of retrospective EPR dosimetry on tooth enamel is widely used worldwide for external dosimetry. However, the method faces serious problems such as availability of tooth samples and the problems of metrological nature – the lack of a metrological standard for bio-samples.

Another problem is the presence of bone-seeking radionuclides in tooth enamel. In particular, ^{90}Sr was in the enamel of teeth of residents of radioactively contaminated areas of the Ural region. The paper provides an overview of methods and approaches that made it possible to overcome metrological problems and take into account the dose of internal enamel exposure. It is shown that the EPR dosimetry method is a good tool for retrospective studies in spite on high uncertainties for small and medium dose detection. EPR dosimetry can also become an expert tool for confirming the fact of exposure in the absence/loss of legally significant supporting documents.

Key words: electron paramagnetic resonance, dosimetry

References

1. Dose evaluation from textile fibers: a post-determination of initial ESR signal/ J. Barthe, V. Kamenopoulou, B. Cattoire, G. Portal// International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes. – 1989. – Vol. 40, № 10–12. – P. 1029–1033. – DOI 10.1016/0883-2889(89)90036-1
2. *Blouin, F. A.* The Effects of Gamma Radiation on Cotton: Part I: Some of the Properties of Purified Cotton Irradiated in Oxygen and Nitrogen Atmospheres/ F. A. Blouin , J. C. Arthur // Textile Research Journal. – 1958. – Vol. 28, № 3. – P. 198–204. – DOI 10.1177/004051755802800302. – EDN JQIWBD.
3. *Brady, J. M.* In vivo dosimetry by electron spin resonance spectroscopy/ J. M. Brady, N. O. Aarestad, H. M. Swartz // Health Phys. – 1968. – Vol. 15. – P. 43–47. – DOI 10.1097/00004032-196807000-00007.
4. EPR spectroscopy of radiation-induced centers in tooth enamel and its application for retrospective dosimetry in Chernobyl case/ O. Bugay, V. Bartchuk, S. Kolesnik, V. Maksimenko // Appl. Magn. Reson. – 1999. – Vol. 16. – P. 317–323. – DOI 10.1007/BF03161921. – EDN XJWGHH.
5. The contribution of CO3(3-) and CO2- to the ESR spectrum near g = 2 of powdered human tooth enamel / F. J. Callens, R. M. Verbeeck, P. F. Matthys [et al.] // Calcif Tissue Int. – 1987. – Vol. 41, № 3. – P. 124–129. – DOI 10.1007/BF02563791. – EDN QMMTBZ.
6. *Chandra, H.* Sulphur radicals formed by cutting alpha-keratin/ H. Chandra, M. C. R. Symons // Nature. – 1987. – Vol. 328. – P. 833–834. – DOI 10.1038/328833a0.
7. High precision EPR dosimetry as a reference tool for validation of other techniques / V. V. Chumak, S. V. Sholom, E. V. Bakhanova [et al.] // Appl Radiat Isot. – 2005. – Vol. 62, № 2 SPEC. ISS. – P. 141-146. – DOI 10.1016/j.apradiso.2004.08.029. – EDN XJRNVB.
8. *Dalgarno, B. G.* Evaluation of ESR as a radiation accident dosimetry technique/ B. G. Dalgarno, J. D. Mcclymont // International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part A. Applied Radiation and Isotopes. – 1989. – Vol. 40, № 10–12. – P. 1013–1020. – DOI 10.1016/0883-2889(89)90034-8.
9. *Delides, C. G.* The degradation of cotton by ionizing radiation/ C. G. Delides, C. Z. Panagiotalidis, O. C. Lega-Panagiotalidis // Textile Res. J. – 1981. – Vol. 51, № 5. – P. 311–317. – DOI 10.1177/004051758105100501. – EDN JTUNLH.
10. *Dodd, N. J.* ESR detection of irradiated food / N. J. Dodd, J. S. Lea, A. J. Swallow // Nature. – 1988. – Vol. 334, № 6181. – P. 387. – DOI 10.1038/334387a0.
11. *Dziedziela, W. M.* Some aspects of radiation-induced transformations of cellulose / W. M. Dziedziela, J. Rosiak // In: Hedvig, P., Schiller, R. (Eds.), Proc. of the Fourth Tihany Symp. on Rad. Chem. – Budapest: Akademia Kiado, 1977. – P. 439.
12. *Gordy, W.* Microwave spectroscopy of biological substances. II. Paramagnetic resonance in X-irradiated carboxylic and hydroxy acids / W. Gordy, W. B. Ard, H. Shields // Proc Natl Acad Sci USA. – 1955. – Vol 41, № 11. – P. 996–1004. – DOI 10.1073/pnas.41.11.996.
13. External dose reconstruction at the shore of the Metlinsky Pond in the former village of Metlino (Techa River, Russia) based on environmental surveys, luminescence measurements and radiation transport modelling/ M. Hiller, C. Woda, M. Degteva [et al.] // Radiation and Environmental Biophysics. – 2022. – Vol. 61, № 1. – P. 87-109. – DOI: 10.1007/s00411-021-00953-3. – EDN RXOQNC.
14. External dose reconstruction for the former village of Metlino (Techa River, Russia) based on environmental surveys, luminescence measurements and radiation transport modelling / M. M. Hiller, C. Woda, N. G. Bougrov [et al.] // Radiat Environ Biophys. – 2017. – Vol. 56, № 2. – P. 139–159. – DOI 10.1007/s00411-017-0688-3. – EDN YVUJZP.
15. ESR dosimetry for A-bomb survivors/ M. Hoshi, S. Sawada, M. Ikeya, T. Miki // In ESR Dating and Dosimetry – Tokyo: IONICS, 1985. – P. 407.
16. *Ikeya, M.* Atomic bomb and accident dosimetry with ESR: natural rocks and human tooth in-vivo spectrometer / M. Ikeya, H. Ishii // Int J Rad Appl Instrum A. – 1989. Vol. 40, № 10–12. – P. 1021–1027. – DOI 10.1016/0883-2889(89)90035-x.
17. *Ikeya, M.* Electron spin resonance dating of animal and human bones / M. Ikeya, T. Miki // Science – 1980. – Vol. 207, № 4434. – P. 977–979. – DOI 10.1126/science.207.4434.977.
18. ESR dosimetry of A-bomb radiation using tooth enamel and granite rocks / M. Ikeya, A. Kai, T. Miki, M. Hoshi // Radiat. Prot. Dosim. – 1986. – V. 17, № 1–4. – P. 181 – 184. – DOI 10.1093/rpd/17.1-4.181.

19. *Ikeya, M.* ESR Dosimetry for Atomic Bomb Survivors Using Shell Butons, and Tooth Enamel / M. Ikeya, J. Miyajima, S. Okajima // Japanese Journal of Applied Physics. – 1984. – Vol. 23. – Part 2. – № 9. – P. 679-710. – DOI 10.1143/JJAP.23.L697.
20. Wide Scale EPR Retrospective Dosimetry: Results and Problems / A. A. Ivannikov, V. G. Skvortzov, V. F. Stepanenko [et al.] // Radiation Protection Dosimetry. – 1997. – Vol. 71, № 3. – P. 175–180. – DOI 10.1093/oxfordjournals.rpd.a032049. – EDN LEMTKD.
21. *Iwasaki, M.* Photo-induced and thermal radical conversions in g-irradiated copolymers of tetrafluoroethylene and hexafluoropropylene as studied by electron spin resonance/ M. Iwasaki, K. Toriyama // J. Chem. Phys. – 1967. – Vol. 47, № 2. – P. 559-563. – DOI. 10.1063/1.1711931.
22. EPR Study of Iron Ion Complexes in Human Blood / R. Krzyminiewski, Z. Kruczyński, B. Dobosz [et al.] // Appl Magn Reson. – 2011. – Vol. 40, № 3. – P. 321-330. – DOI 10.1007/s00723-011-0219-3. – EDN VHREYS.
23. *Nakajima, T.* The use of organic substances as emergency dosimeters / T. Nakajima // Int. J. Appl. Radiat. Isot. – 1982. – V. 33, № 11. – P. 1077-1084. – DOI 10.1016/0020-708X(82)90236-8.
24. *Ostrowski, K.* Stable radiation-induced paramagnetic entities in tissue mineral and their use in calcified tissue research / K. Ostrowski, A. Dziedzic-Goclawska, W. Stachowicz // In W. Pryor (Eds) Free Radicals in Biology. – 1980. – Vol. 4. – New York: Academic Press. – P. 321–344. – DOI 10.1016/B978-0-12-566504-9.50017-9.
25. ESR analysis of irradiated frogs' legs and fishes/ J. Raffi, J. C. Evans, J. P. Agnel [et al.] // Int J Rad Appl Instrum A. – 1989. – Vol. 40, № 10–12. – P. 1215–1218. – DOI. 10.1016/0883-2889(89)90066-x.
26. *Regulla, D. F.* Dose estimation by ESR spectroscopy at a fatal radiation accident/ D. F. Regulla, U. Deffner// Appl. Radiat. Isot. – 1989. – V. 40. – № 10–12. – P. 1039-1043. – DOI 10.1016/0883-2889(89)90038-5
27. Electron spin resonance dosimetry of teeth of Goiânia radiation accident victims/ A. M. Rossi, C. C. Wafcheck, E. F. de Jesus, F. Pelegrini // Appl Radiat Isot. – 2000. – Vol. 52, № 5. – P. 1297–303. – DOI 10.1016/s0969-8043(00)00087-7.
28. *Schwarcz, H. P.* ESR studies of tooth enamel / H. P. Schwarcz // Nuclear Tracks and Radiation Measurements. – 1982. – Vol. 10, № 4–6. – P. 865–867. – DOI 10.1016/0735-245x(85)90101-2.
29. Radiation Dosimetry for Residents of the Chernobyl Region: A Comparison of Cytogenetic and Electron Spin Resonance Methods / V. A. Serezhenkov, E. V. Domracheva, G. A. Klevezal [et al.] // Radiation Protection Dosimetry. – 1992. – Vol. 42, № 1. – P. 33–36. – DOI 10.1093/oxfordjournals.rpd.a081274. – EDN UODPPR.
30. The suitability of FISH chromosome painting and ESR-spectroscopy of tooth enamel assays for retrospective dose reconstruction / A. Sevan'kaev, I. Khvostunov, D. Lloyd [et al.] // J Radiat Res. – 2006. – Vol. 47, №. Suppl A. – P. 75–80. - DOI 10.1269/jrr.47.a75. – EDN LJZCHZ.
31. Extra high doses detected in the enamel of human teeth in the Techa riverside region / E. A. Shishkina, M. O. Degteva, E. I. Tolstykh [et al.] // Radiat Meas. – 2011. – Vol. 46, № 760–764. – DOI 10.1016/j.radmeas.2011.03.034. – EDN PEASSJ.
32. Concentrations of 90Sr in the tooth tissues 60 years after intake: results of TL measurements and applications for Techa River dosimetry / E. A. Shishkina, E. I. Tolstykh, E. Verdi [et al.] // Radiat Environ Biophys. – 2014. – Vol. 53, № 1. – P. 159–173. – DOI 10.1007/s00411-013-0501-x. – EDN UFPTXH
33. Application of EPR tooth dosimetry for validation of the calculated external doses: Experience in dosimetry for the Techa River Cohort / E. A. Shishkina, A. Y. Volchkova, D. V. Ivanov [et al.] // Radiat Prot Dosim. – 2019. – Vol. 186, № 1. – P. 70–77. – DOI 10.1093/rpd/ncy258. – EDN IXCBJX.
34. External dose reconstruction in tooth enamel of Techa riverside residents / E. A. Shishkina, A. Y. Volchkova, Y. S. Timofeev [et al.] // Radiat Environ Biophys. – 2016. – Vol. 55, № 4. – P. 477–499. – DOI 10.1007/s00411-016-0666-1. – EDN WLQIXT.
35. EPR tooth dosimetry of SNTS area inhabitants / S. Sholom, M. Desrosiers, A. Bouville [et al.] // Radiat Meas. – 2007. – Vol. 42, № 6. – P. 1037–1040. – DOI 10.1016/j.radmeas.2007.05.007. – EDN MMAVYP.
36. Evaluation of absorbed dose of gamma and X-ray radiation using bone tissue as a dosemeter / W. Stachowicz, J. Michalik, A. Dziedzic-Goclavska, R. Ostrowski // Nucleonica – 1974. – Vol. 19. – P. 845–850.

37. *Swartz, H. M.* Electron spin resonance spectra of some normal tissues: Effect of microwave power/ H. M. Swartz, R. P. Molenda // Science. – 1965. – Vol. 148, № 3666. – P. 94–95. – DOI 10.1126/science.148.3666.94.b.
38. In vivo EPR for dosimetry/ H. M. Swartz, G. Burke, M. Coey [et al.] // Radiation Measurements. – 2007. – Vol. 42, № 6–7. – P. 1075–1084. – DOI 10.1016/j.radmeas.2007.05.023. – EDN MMAVXL.
39. *Tatsumi J. M.* ESR dosimetry using human tooth enamel/ J. M. Tatsumi, S. Okajima // In ESR Dating and Dosimetry. – 1985. – Tokyo: IONICS. – P. 397.
40. Strontium metabolism in teeth and enamel dose assessment: Analysis of the Techa River data / E. I. Tolstykh, M. O. Degteva, V. P. Kozheurov [et al.] // Radiat Environ Biophys. – 2000. – Vol. 39, № 3. – P. 161–171. – DOI 10.1007/s004110000059. – EDN LFZVJD.
41. In Vivo Electron Paramagnetic Resonance Tooth Dosimetry: Dependence of Radiation-Induced Signal Amplitude on the Enamel Thickness and Surface Area of Ex Vivo Human Teeth / M. Umakoshi, I. Yamaguchi, H. Hirata [et al.]// Health Phys. – 2017. – Vol. 113, № 4. – P. 262–270. – DOI 10.1097/HP.0000000000000698. – EDN YHRIAZ.
42. EPR dosimetry of bone gains accuracy by isolation of calcified tissue / A. Wieser, E. Haskell, G. Kenner, F. Bruenger // Appl Radiat Isot. – 1994. – Vol. 45, № 4. – P. 525–526. – DOI 10.1016/0969-8043(94)90119-8.
43. Comparison of EPR occupational lifetime external dose assessments for Mayak nuclear workers and film badge dose data / A. Wieser, E. Vasilenko, P. Fattibene [et al.] // Radiat Environ Biophys. – 2006. – Vol. 44, № 4. – P. 279–288. – DOI 10.1007/s00411-005-0024-1. – EDN LJUKJP.
44. Unexpected superlinear dose dependence of the E′1 centre in fused silica / A. Wieser, Y. Göksu, D. R. Regulla, A. Waibel // International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements. – 1991. – Vol. 18, № 1–2. – P. 175–178. – DOI:10.1016/1359-0189(91)90109-u.
45. In vivo EPR tooth dosimetry for triage after a radiation event involving large populations / B. B. Williams, A. B. Flood, I. Salikhov [et al.] // Radiat Environ Biophys. – 2014. – Vol. 53, № 2. – P. 335–346. – DOI 10.1007/s00411-014-0534-9. – EDN YFFBQX.
46. Luminescence dosimetry in a contaminated settlement of the Techa River valley, Southern Urals, Russia / C. Woda, A. Ulanovsky, N. G. Bougrov [et al.] // Radiat Meas. – 2011. – Vol. 46, № 3. – P. 277–285. – DOI 10.1016/j.radmeas.2010.06.028. – EDN OHZRZ.
47. Luminescence dosimetry for evaluation of the external exposure in Metlino, upper Techa River valley, Southern Urals, Russia: Analysis of new results / C. Woda, M. Hiller, J. A. Ademola [et al.] // Applied Radiation and Isotopes. – 2023. – Vol. 193. – P. 110618. – DOI 10.1016/j.apradiso.2022.110618. – EDN HANYLZ.
48. EPR pilot study on the population of Stepnogorsk city living in the vicinity of a uranium processing plant / K. Zhumadilov, A. Ivannikov, V. Stepanenko [et al.] // Radiat Environ Biophys. – 2015. – Vol. 54, № 1. – P. 145–149. – DOI 10.1007/s00411-014-0573-2. – EDN TVNTAR.
49. *Blyumenfel'd, L. A.* Dejstvie ioniziruyushchego izlucheniya na suhie preparaty aminokislot, peptidov, belkov i liofilizirovannyh tkanej / L. A. Blyumenfel'd, A. E. Kalmanson // Biofizika. – 1957. – Vol.2, № 5. – P. 552–565. (in Russian).
50. *Volchkova, A. Yu.* Razmery rezcov sel'skih zhitelej Urala / A. Yu. Volchkova, E. A. Shishkina // Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2013, № 7. – P. 112–114. – EDN PYWJTZ. (in Russian).
51. Application of the EPR and FISH Methods to Dose Reconstruction for People Exposed in the Techa River Area / M. O. Degteva, E. A. Shishkina, E. I. Tolstykh [et al.] // Radiation biology. Radioecology. – 2017. – Vol. 57, № 1. – P. 30–41. – DOI 10.7868/S0869803117010052. – EDN YIVYRZ.
52. *Zavojskij, E. K.* Novyj metod issledovaniya paramagnitnoj absorbcii / E. K.Zavojskij, S. A. Al'tshuler, B. M. Kozyrev // ZhETF. – 1944. – Vol.14, №10–11. – P. 407–409. (in Russian).
53. *Romanyuha, A. A.* Opyt EPR-rekonstrukcii individual'nyh doz, pogloshchennyh naseleniem v zone vliyaniya Tockogo yadernogo vzryva / A. A. Romanyuha, D. V. Ivanov., A. G. Vasil'ev // Problemy otdalennyh ekologo-geneticheskih posledstvij radiacionnyh incidentov: Tockij yadernyj vzryv: materialy Mezhregion. nauch. konf., 30 okt. – 2 nov. 2000. / Ros. akad. nauk, Ural. otd-nie, In-t ekologii rastenij i zhivotnyh; [otv. red., avt. predisl. d-r biol. nauk A. G. Vasil'ev]. – Ekaterinburg : Ekaterinburg, 2000. – P .100–106. (in Russian).