DOI: 10.21870/0131-3878-2017-26-4-74-83

ЭПР-дозиметрия населения, проживающего вблизи радиоактивного следа после ядерного испытания 29 августа 1949 г. на Семипалатинском испытательном полигоне

Жумадилов К.Ш.¹, Иванников А.И.², Степаненко В.Ф.², Скворцов В.Г.², Тойода Ш.³, Эндо С.⁴, Танака К.⁴, Каприн А.Д.⁵, Галкин В.Н.², Иванов С.А.^{2,5}, Колыженков Т.В.², Ахмедова У.А.², Богачева В.В.², Хоши М.⁴

¹ Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилёва, Астана, Казахстан;

² МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, Обнинск;

³ Университет науки Окаямы, Окаяма, Япония;

⁴ Университет Хиросимы, Хиросима, Япония;

⁵ ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, Обнинск

Метод электронно-парамагнитной резонансной (ЭПР) ретроспективной дозиметрии по образцам зубной эмали был использован для определения доз облучения жителей сёл Бодене и Долонь (Бескарагайский район, Восточно-Казахстанская область), которые расположены вблизи следа радиоактивных выпадений вследствие первого ядерного испытания в СССР 29 августа 1949 г. Для проведения данного исследования были взяты образцы 35 зубов (по медицинским показаниям) у взрослого населения сёл Бодене и Долонь, 26 из них получены из села Бодене (расположенного к юго-востоку от Долони), 9 образцов получены из села Долонь (вблизи радиоактивного следа). Кроме того, 11 зубов были собраны в ходе обследования населения села Кокпекты (400 км восточнее испытательного полигона), которое не подвергалось радиоактивному облучению (эти образцы были включены в контрольную группу). Поскольку не из всех образцов удалось извлечь достаточное количество эмали зуба, то в окончательный анализ были включены 29 образцов. Установлено, что максимальная накопленная индивидуальная доза среди обследованных жителей сёл Бодене и Долонь равна 313 мГр. Средняя накопленная доза внешнего облучения среди обследованных жителей с зубной эмалью, сформированной до 1949 г., равна 74 мГр. У лиц с зубной эмалью, сформированной после 1949 г. (то есть в период, когда более 95% накопленной дозы внешнего облучения от испытания 1949 г. уже была сформирована), средняя доза составляет 11 мГр. Год формирования эмали зубов для различных возрастов обследованных лиц определяли в соответствии с Техническим Документом МАГАТЭ, 2002 г.

Ключевые слова: ЭПР-дозиметрия, электронно-парамагнитный резонанс, ретроспективная дозиметрия, зубная эмаль, накопленные дозы облучения населения, внешнее облучение, Семипалатинский испытательный ядерный полигон, ядерное испытание 1949 г., радиоактивные выпадения, Долонь, Бодене, Республика Казахстан.

Введение

29 августа 1949 г. было проведено первое в СССР ядерное испытание на площадке «Опытное поле» на территории Семипалатинского испытательного ядерного полигона (СИЯП). Данные прямых измерений радиационной обстановки после этого испытания весьма ограничены, а существующие оценки доз облучения населения противоречивы [1-3]. Поэтому методы инструментальной ретроспективной дозиметрии являются весьма полезными для получения информации о дозах облучения населения, проживавшего в этот период возле радиоактивного следа, образовавшегося в результате ядерного испытания [2-4].

Жумадилов К.Ш. – зав. каф., к.т.н., проф. ЕНУ им. Л.Н. Гумилёва. Иванников А.И. – в.н.с., к. ф.-м.н.; Степаненко В.Ф.* – зав. лаб., д.б.н., проф.; Скворцов В.Г. – зав. лаб., к.б.н.; Галкин В.Н. – директор, д.м.н., проф.; Иванов С.А. – зам. ген. директора, зав. отд., д.м.н.; Колыженков Т.В. – с.н.с., к.б.н.; Ахмедова У.А. – м.н.с.; Богачева В.В. – м.н.с. МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России. Тойода Ш. – проф., Университет науки Окаямы. Эндо С. – проф.; Танака К. – проф.; Хоши М. – проф. Университет Хиросимы. Каприн А.Д. – ген. директор, акад. РАН, д.м.н., проф. ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России.

*Контакты: 249036, Калужская обл., Обнинск, ул. Королева, 4. Тел.: (484) 399-7002; e-mail: mrrc@mrrc.obninsk.ru.

ЭПР-дозиметрия является эффективным инструментом для работ по восстановлению полученных доз [1-6]. С помощью этого метода возможно определение индивидуальных доз облучения даже спустя более 70 лет после облучения. С применением ЭПР-технологии измеряется концентрация стабильных свободных радикалов, образованных вследствие воздействия ионизирующего излучения на зубную эмаль [1, 3, 7].

Целью данной работы является определение доз, полученных жителями сёл Бодене и Долонь, расположенных вблизи следа радиоактивных выпадений, образованного вследствие первого ядерного испытания СССР в августе 1949 г. Измерения проводили посредством использования метода ЭПР-дозиметрии с применением образцов зубной эмали человека, собранных в вышеназванных населённых пунктах [5, 6]. Условия измерений были оптимизированы в целях получения наилучшей воспроизводимости результатов [8-12].

Материалы и методы

Отбор образцов. Для проведения данного исследования были взяты образцы 35 зубов (по медицинским показаниям) у взрослого населения сёл Бодене и Долонь, 26 из них получены из села Бодене (расположенного к юго-востоку от Долони), 9 образцов получены из села Долонь (вблизи радиоактивного следа). Кроме того, 11 зубов были собраны в ходе обследования населения села Кокпекты (400 км восточнее испытательного полигона), которое не подвергалось радиоактивному облучению (эти образцы были включены в контрольную группу). Поскольку не из всех образцов удалось извлечь достаточное количество эмали зуба, то в окончательный анализ были включены 29 образцов.

Подготовка образцов. Эмаль механически отделили от дентина с использованием твердосплавного зубного бора. Дентин осторожно удалили, охлаждая водой во избежание перегрева образца, провоцирующего образование дополнительного ЭПР-сигнала и значительное изменение формы ЭПР-сигнала. Эмаль размельчали на гранулы диаметром 0,5-1,5 мм. Из каждого зуба были подготовлены по 2 образца (из щёчной и языковой частей каждого зуба).

Калибровочные образцы. Образцы эмали для получения калибровочной дозовой зависимости были подготовлены из коренных зубов, взятых у жителей села Кокпекты, которое не подвергалось радиоактивному воздействию вследствие ядерных испытаний на СИЯП. Подготовка этих образцов для измерений была проведена в стоматологической клинике Университета Хиросимы. Эмали из разных зубов были смешаны и далее из этой смеси были подготовлены аликвоты массой 100 мг. Аликвоты были облучены в дозах 100, 200, 300 и 500 мГр соответственно стандартным источником ^{60}Co в Университете Хиросимы. Дозы облучения были градуированы Японским третичным эталоном с использованием тканеэквивалентной ионизационной камеры (погрешность калибровки – <3%). В период облучения пробы размещали между двумя тканеэквивалентными дисками диаметром 4 мм, в условиях электронного равновесия. Поглощённая доза в эмали зуба при таких условиях облучения близка к дозе, измеряемой тканеэквивалентным дозиметром.

Измерения ЭПР-спектров. ЭПР-измерения были выполнены не менее чем через 10 дней после облучения и подготовки проб для того, чтобы все сигналы, обусловленные механической

обработкой, ослабили и/или пришли в равновесное состояние. Измерения были осуществлены в X диапазоне частот на ЭПР-спектрометре JEOL JES-FA 100 при комнатной температуре 21 °С. Спектрометр снабжён цилиндрическим резонатором ТЭ ES-UCX2 с высоким коэффициентом добротности. Были установлены следующие параметры измерения спектров: амплитуда модулирующего сигнала – 0,3 Мт, частота модуляции – 100 кГц, ресивер временной постоянной – 30 мс, время развёртки – 30 с, кадровая развёртка – 10 Мт, микроволновая мощность – 2 мВт, число сканирований – 40, время набора спектров – 20 мин. Микроволновая мощность и время набора были выбраны после их оптимизации для достижения наилучшей точности определения доз [8-12].

Для ЭПР-измерений пробы эмали были помещены в кварцевую трубку JEOL с внешним диаметром 4 мм и внутренним диаметром 3 мм. Одна трубка была использована для всех проб. Трубка была помещена в СВЧ-резонатор таким образом, чтобы центр пробы совпал с центром резонатора. Сигнал от образца, содержащего двуокись марганца (используемого в качестве маркера) и установленного в резонаторе, фиксировался наряду со спектрами пробы эмали. Для усреднения спектральной анизотропии каждую пробу измеряли 4 раза – после встряхивания между за мерами и с поворотом трубки на 90°.

Анализ ЭПР-спектров. Специально разработанное программное обеспечение [8-12] было использовано для выделения вызываемого облучением сигнала (ВОС) из суммарного ЭПР-спектра и для определения его интенсивности. Данная процедура позволяет выполнить вычисления (обратные процедуре свёртки) для всего спектрального диапазона облучённой эмали в ВОС и с учётом фоновых сигнала (ФС) посредством применения метода наименьших квадратов – для достижения наилучшего соответствия между спектром модели и экспериментальным спектром.

Выбор оптимальных параметров измерения ЭПР-спектра при калибровочных измерениях. Спектры 10 проб, облучённых номинальными дозами 100, 200, 300 и 500 мГр по две по каждой дозе, были измерены на разных уровнях микроволновой мощности (1, 2, 5 и 10 мВт) и разных показателях времени накопления спектров (5, 10, 20, 40 и 60 мин). Погрешность определения дозы рассчитана как среднеквадратичное отклонение экспериментальных доз от номинальных.

Примеры зависимостей экспериментальных доз от номинальных доз по результатам, полученным на основе измерений одного спектра, и усреднённых результатов, полученных на основе четырёх измерений спектров, показаны на рис. 1. Среднеквадратичное отклонение величин экспериментальных доз от номинальных доз было использовано в качестве параметра, характеризующего погрешность определения дозы. Квадратичное отклонение было определено для экспериментальных доз, полученных из единичного измерения (SDS) и для средней дозы, полученной из четырёх измерений (SDR).

Качество спектра на стадии спектральной отработки характеризуется остаточным сигналом, получаемым вычитанием модельного спектра из экспериментального спектра. Интенсивность данного сигнала характеризуется остаточной суммой (ОС), которая является среднеквадратичной амплитудой остаточного сигнала. ОС возникает в результате спектрального шума и неполного соответствия модели экспериментальному спектру. Зависимость ОС от времени накопления, измеренная на разных уровнях микроволновой мощности, показана на рис. 2. Видно, что ОС значительно сокращается при увеличении времени накопления до 20 мин. При более высоком времени накопления ОС постепенно сокращается при 1 мВт и даже имеет тенденцию к

росту при мощности 2 мВт и выше. Следовательно, увеличение времени накопления выше некоторого ограничения не является эффективным для улучшения качества спектра. В данном исследовании ограничение было принято в диапазоне 20-40 мин.

Рис. 1. Примеры зависимостей экспериментальных доз от номинальной дозы, при одинарном измерении спектра (а), средние результаты, полученные для четырёх повторных измерений спектров (б).

Рис. 2. Зависимости остаточной суммы от времени набора спектра. Определяется при различной мощности СВЧ.

Для установления оптимального времени накопления были проанализированы зависимости SDS и SDR от времени накопления, определённого при разных уровнях мощности (рис. 3). Видно, что данные параметры значительно уменьшаются при времени накопления до 20 мин и затем уменьшаются намного слабее или даже склонны к увеличению по некоторым уровням мощности. Причина увеличения неопределённости может быть та же, что и для ОС – результаты нестабильности спектрометров становятся очевидными при большом времени накопления.

Для определения оптимальной мощности СВЧ-излучения были также проанализированы зависимости SDS и SDR от мощности микроволнового излучения, определённой при различных показателях времени накопления (рис. 4). В качестве оптимальной была выбрана мощность СВЧ-излучения 2 мВт.

Рис. 3. Стандартное отклонение экспериментальных доз от номинальных доз в зависимости от времени накопления при различной мощности СВЧ, полученных при одинарном измерении спектра (а), для средних результатов, полученных при четырёх повторных измерениях спектров (б).

Рис.4. Стандартное отклонение экспериментальных доз от номинальных доз в зависимости от мощности СВЧ, полученной при разном времени накопления: (а) – для экспериментальных доз, при одинарном измерении спектра; для экспериментальных доз, (б) – усреднённое по результатам четырёх повторных измерений спектров.

Оценки доз. Экспериментальное значение суммарной поглощённой дозы, обусловленное вызываемым облучением сигнала (ВОС), включает в себя накопленную дозу от естественного радиационного фона от даты формирования зубной эмали и техногенной (аварийной) дозы.

Продолжительность жизни зубной эмали была рассчитана путём вычитания среднего возраста формирования зуба для конкретного расположения зуба в челюсти человека из возраста человека на момент измерения. Возрасты формирования зубной эмали для конкретного расположения зуба в челюсти человека были установлены согласно данным работы [4].

Для всех проанализированных образцов эмали техногенные дозы были рассчитаны с использованием соотношения:

$$D_{ex} = D_{en} - TA \cdot D_b, \quad (1)$$

где D_{en} – экспериментальное значение суммарной поглощённой дозы, обусловленное ВОС, мГр; TA – возраст зубной эмали, лет; D_b – фоновая доза облучения, 0,8 мГр/год.

Оценки погрешностей. Погрешности определения доз (E_r , стандартное отклонение) были оценены по полуэмпирической формуле:

$$Er^2 = Er_1^2 + Er_2^2 + (Er_3 D_{en})^2, \quad (2)$$

где $Er_1=25$ мГр – вклад, вызванный посторонними сигналами в эмалевом спектре, вариациями формы линии ФС и неопределённостью уровня смещения при калибровке; $Er_3=0,12$ мГр – вклад, зависимый от дозы, вызванный вариацией чувствительности эмали и неопределённостью в определении калибровки градуировочной прямой; D_{en} – определённая ЭПР-методом экспериментальная доза, поглощённая эмалью; Er_2 – вклад, спровоцированный, в основном, шумом в спектрах и нестабильностью спектрометра. Данный параметр варьирует для различных проб и повышается с уменьшением массы образца. В данной работе он определён на основе погрешности определения амплитуды ВОС при обработке спектра посредством преобразования в единицы дозы с применением калибровки градуировочной прямой.

Зависимость данного параметра от массы пробы характеризуется следующим соотношением:

$$Er_2 = Er_{2m}/(m/100),$$

где $Er_{2m}=20$ мГр; $m/100$ – масса пробы (в мг), приведённый к 100 мг.

Результаты

Результаты измерений индивидуальных накопленных поглощённых доз приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты оценок индивидуальных накопленных доз методом ЭПР-дозиметрии по эмали зубов человека

№	Код образца	Год формирования эмали	Номер положения зуба в челюсти	Щёчная сторона			Языковая сторона			D_{ex} (мГр)	E_{rex}	Место проживания
				m (мг)	D_{en} (мГр)	E_r	m (мг)	D_{en} (мГр)	E_r			
1	402	1969	4	52	119,9	38,9	21	205	87,8	115,5	47,35	Долонь
2	403	1946	6	101	69,1	25,7	102	68,8	26,7	59,7	36,3	Долонь
3	406	1949	7	139	145,8	21	180	116,7	18,4	86,5	15,65	Долонь
4	409	1951	4	52	92,4	24,9	64	1,7	44,9	0,1	29,15	Долонь
5	362	1936	5	43	80,6	61,5	51	10,9	47,7	-11,1	44,3	Бодене
6	363	1958	5	113	3,2	43,5	119	-8,2	48,3	-39,4	42,8	Бодене
7	364	1965	6	131	40	37	78	71	17,7	22,9	25,55	Бодене
8	367	1947	8	88	-43	54,8	108	31,7	12,9	-50,3	24,45	Бодене
9	368	1946	7	96	61,7	14,2	137	29,6	14,4	-5	11	Бодене
10	370	1956	6	96	19	24,6	87	23,4	25,9	-14,4	19,3	Бодене
11	371	1960	7	91	52,5	25,9	66	120,6	46,9	48,9	23,5	Бодене
12	372	1943	7	61	146,6	27,3	38	65,1	80	66,7	42,15	Бодене
13	373	1949	7	75	32,7	37,4	82	74,1	36,6	9,2	30,15	Бодене
14	374	1966	7	96	10,6	29,5	104	-1,9	27,8	-25,3	19,6	Бодене
15	375	1939	6	94	195,3	53,5	46	144,8	62	128,1	47,25	Бодене
16	376	1955	6	96	66,4	27	55	92,9	38,8	39,1	23,45	Бодене
17	377	1955	5	75	73,5	33,3	70	117,4	29,6	53,4	26,15	Бодене
18	378	1959	7	90	113,6	23,8	78	69,4	40,8	57,5	24,55	Бодене
19	379	1945	6	63	175,6	34,1	42	152,3	51,7	119,7	32,45	Бодене
20	381	1954	7	120	83,3	20,2	113	49,1	20,2	25,5	15,2	Бодене
21	382	1974	8	132	14,2	15,5	97	63,5	23	39,6	21,5	Бодене
22	383	1969	7	115	4,1	20,4	93	7,3	26,2	-22,9	18,85	Бодене
23	385	1931	6	103	434,5	11,2	74	309,4	8,3	313,55	8,95	Бодене
24	386	1942	5	90	100,9	22,8	25	120,3	98,7	55,6	33,8	Бодене
25	4100	1964	5	148	16,6	20,6	162	6,7	21,6	-19,6	17,3	Кокпекты
26	4110	1966	6	191	-0,6	24	219	16,8	21,8	-22,1	19,3	Кокпекты
27	4140	1968	7	229	-64,6	32,4	171	-11,1	32,9	-66,7	26,6	Кокпекты
28	4170	1975	7	199	2,2	25,7	200	93,6	40,2	24,1	28,75	Кокпекты
29	4180	1964	6	273	-7,7	30,1	158	55,7	29,7	-8,6	26,4	Кокпекты

m – масса пробы; D_{en} – суммарная индивидуальная накопленная поглощённая доза в эмали; E_r – неопределённость определения дозы; D_{ex} – техногенная (аварийная) доза (см. соотношение (1)); E_{rex} – неопределённость техногенной дозы.

Установлено, что величины индивидуальных техногенных поглощённых доз внешнего облучения не превышают 313 ± 9 мГр. Для некоторых доз были получены отрицательные значения. Это не является чем-то неожиданным, поскольку измерения были выполнены на уровне порога чувствительности метода (около 30 мГр). Естественно, что некоторые значения становятся отрицательными в соответствии с их статистическими распределениями. Отрицательные величины поглощённых доз, возможно, являются результатом недооценки их неопределённости. Для уточнения их величин, по всей видимости, необходимо использовать не среднюю величину мощности фоновой дозы, а её значение, характерное для мест расположения обследуемых населённых пунктов, что является предметом дальнейших исследований. Тем не менее, эти отрицательные значения не были исключены из анализа – с тем, чтобы получить несмещённые величины средних доз.

Среднеквадратичное отклонение поглощённых доз между языковыми и щёчными частями находится в рамках среднего значения неопределённости расчёта дозы. Систематически повышенные дозы в эмали щёчной области отсутствуют. Это означает, что эмаль не подвергалась солнечному световому излучению и медицинскому рентгеновскому облучению.

Максимальная величина индивидуальной накопленной дозы внешнего облучения (313 ± 9 мГр) была установлена для одного образца (дата формирования эмали зуба – до 1949 г.). Среднее значение аварийной дозы для образцов эмали с датой начала её формирования до 1949 г. составляет 74 ± 45 мГр, а для образцов эмали зубов, сформированной после 1949 г., средняя доза составляет $11,5 \pm 38$ мГр.

Заключение

Метод электронно-парамагнитной резонансной (ЭПР) ретроспективной дозиметрии по образцам зубной эмали был использован для определения доз облучения жителей сёл Бодене и Долонь (Бескарагайский район, Восточно-Казахстанская область), которые расположены вблизи следа радиоактивных выпадений вследствие первого ядерного испытания в СССР 29 августа 1949 г. Установлено, что максимальная накопленная индивидуальная доза среди обследованных жителей сёл Бодене и Долонь равна 313 ± 9 мГр. Средняя накопленная доза внешнего облучения среди обследованных жителей с зубной эмалью, сформированной до 1949 г., равна 74 ± 45 мГр. У лиц с зубной эмалью, сформированной после 1949 г., средняя накопленная доза внешнего облучения равна 11 ± 38 мГр.

Исследования по данной работе были поддержаны грантом Министерства образования и науки Республики Казахстан (5284/GF4 соглашение № 47).

Исследования были поддержаны МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, Обнинск, Россия, путём предоставления программных средств для обработки ЭПР-спектров и возможности применения соответствующих методик [13], а также Российским фондом фундаментальных исследований (№ 16-04-01276).

Литература

1. **Stepanenko V.F., Hoshi A., Ivannikov A.I., Bailiff I.K., Zhumadilov K., Skvortsov V.G., Argembaeva R., Tsyb A.F.** The 1st Nuclear Test in the former USSR of 29 August, 1949: comparison of individual dose estimates by modeling with EPR retrospective dosimetry and luminescence retrospective dosimetry data for Dolon village, Kazakhstan //Radiat. Meas. 2007. V. 42, N 6-7. P. 1041-1048.
2. **Gordeev K., Shinkarev S., Ilyin L., Bouville A., Hoshi M., Luckyanov N., Simon S.L.** Retrospective dose assessment for the population living in areas of local fallout from the Semipalatinsk nuclear test site. Part I: External exposure //J. Radiat. Res. 2006. V. 47. Suppl. A. P. A129-A136.
3. **Stepanenko V.F., Hoshi M., Dubasov Yu.V., Sakaguchi A., Yamamoto M., Orlov M., Bailiff I.K., Ivannikov A.I., Skvortsov V.G., Kryukova I.G., Zhumadilov K.S., Apsalikov K.N., Gusev B.I.** A gradient of radioactive contamination in Dolon village near SNTS and comparison of computed dose values with instrumental estimates for the 29 August, 1949 nuclear test //J. Radiat. Res. 2006. V. 47. Suppl. A. P. A149-A158.
4. IAEA Report. Use of electron paramagnetic resonance dosimetry with tooth enamel for retrospective dose assessment. Report of a coordinated research project, IAEA-TECDOC-1331. Vienna, 2002.
5. **Ivannikov A., Zhumadilov K., Tieliewuhan E., Jiao L., Apsalikov K.N., Berekenova G., Zhumadilov Zh., Toyoda Sh., Miyazawa C., Skvortsov V., Stepanenko V., Endo S., Tanaka K., Hoshi M.** Results of EPR dosimetry for population in the vicinity of the most contaminating radioactive fallout trace after the first nuclear test in the Semipalatinsk Test Site //J. Radiat. Res. 2006. V. 47. Suppl. A. P. A39-A46.
6. **Zhumadilov K., Ivannikov A., Apsalikov K.N., Zhumadilov Zh., Toyoda Sh., Tieliewuhan E., Endo S., Tanaka K., Miyazawa C., Okamoto T., Hoshi M.** Radiation dose estimation by tooth enamel EPR dosimetry for residents of Dolon and Bodene //J. Radiat. Res. 2006. V. 47. Suppl. A. P. A47-A53.
7. **Fattibene P., Wieser A., Adolfsson E., Benevides L.A., Brai M., Callens F., Chumak V., Ciesielski B., Della Monaca S., Emerich K., Gustafsson H., Hirai Y., Hoshi M., Israelsson A., Ivannikov A., Ivanov D., Kaminska J., Wu Ke, Lund E., Marrale M., Martens L., Miyazawa C., Nakamura N., Panzer W., Pivovarov S., Reyes R.A., Rodzi M., Romanyukha A.A., Rukhin A., Sholom S., Skvortsov V., Stepanenko V., Tarpan M.A., Thierens H., Toyoda S., Trompier F., Verdi E., Zhumadilov K.** The 4th International Comparison on EPR Dosimetry with Tooth Enamel. Part 1: Report on the results //Radiat. Meas. 2011. V. 46, N 9. P. 765-771.
8. **Tielewuhan E., Ivannikov A., Zhumadilov K., Nalapko M., Tikunov D., Skvortsov V., Stepanenko V., Toyoda Sh., Tanaka K., Endo S., Hoshi M.** Spectra processing at tooth enamel dosimetry: analytical description of EPR spectrum at different microwave power //Radiat. Meas. 2006. V. 41, N 4. P. 410-417.
9. **Zhumadilov K.S., Ivannikov A.I., Skvortsov V.G., Zhumadilov Zh.S., Endo S., Tanaka K., Hoshi M.** Tooth enamel EPR dosimetry: selecting optimal spectra registration parameters and effects of sample mass on sensitivity //J. Radiat. Res. 2005. V. 46, N 4. P. 435-442.
10. **Zhumadilov K., Ivannikov A., Apsalikov K., Zhumadilov Zh., Stepanenko V., Skvortsov V., Berekenova G., Toyoda S., Endo S., Tanaka K., Miyazawa C., Hoshi M.** Results of tooth enamel EPR dosimetry for population living in the vicinity of the Semipalatinsk nuclear test site //Radiat. Meas. 2007. V. 42, N 6-7. P. 1049-1052.
11. **Ivannikov A.I., Sanin D., Nalapko M., Skvortsov V.G., Stepanenko V.F., Tsyb A.F., Trompier F., Zhumadilov K., Hoshi M.** Dental enamel EPR dosimetry: comparative testing of the spectra processing methods for determination of Radiation induced-signal amplitude //Health Phys. 2010. V. 98, N 2. P. 345-351.
12. **Ivannikov A.I., Skvortsov V.G., Stepanenko V.F., Zhumadilov K.Sh.** Comparative analysis between radiation doses obtained by EPR dosimetry using tooth enamel and established analytical methods for the population of radioactively contaminated territories //Radiat. Prot. Dosim. 2014. V. 159, N 1-4. P. 125-129.
13. **Каприн А.Д., Галкин В.Н., Жаворонков Л.П., Иванов В.К., Иванов С.А., Романко Ю.С.** Синтез фундаментальных и прикладных исследований – основа обеспечения высокого уровня научных результатов и внедрения их в медицинскую практику //Радиация и риск. 2017. Т. 26, № 2. С. 26-40.

EPR dosimetry among the population living in proximity to radioactive trace after the nuclear test on 29 August, 1949 at the Semipalatinsk nuclear test site

Zhumadilov K.Sh.¹, Ivannikov A.I.², Stepanenko V.F.², Skvortsov V.G.², Toyoda Sh.³, Endo S.⁴, Tanaka K.⁴, Kaprin A.D.⁵, Galkin V.N.², Ivanov S.A.^{2,5}, Kolyzhenkov T.V.², Akhmedova U.A.², Bogacheva V.V.², Hoshi M.⁴

¹ L. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan;

² A. Tsyb MRRC, Obninsk;

³ Okayama University of Science, Okayama, Japan;

⁴ Hiroshima University, Hiroshima, Japan;

⁵ NMRC of Radiology, Obninsk

Electron-paramagnetic resonance retrospective dosimetry (EPR) with tooth enamel was used for measuring radiation dose in residents of Bodene and Dolon villages of Beskaragay rayon, Vostochno-Kazakhstanskaya oblast, Kazakhstan. The villages are located nearby the trace of radioactive fallout following the first nuclear test carried out on August 29, 1949 in the USSR. Fragments of 35 teeth extracted from adult residents of Bodene (26 fragments) and Dolon (9 fragments) due to medical reasons were used for EPR dosimetry. The village of Dolon is in the close proximity to the trace, the village of Bodene is located to the south-east of the Dolon village. In addition to that, fragments of 11 teeth of residents of the Kokpety village located 400 km to the east of the nuclear test site were used as well. The villagers were not exposed to radiation and represented a control group in the study. Because we could not obtain proper amount of the dental enamel from 35 teeth, samples of enamel from 29 teeth were used for dosimetry purposes. The highest radiation dose received by residents of Bodene and Dolon villages was found to be 313 mGy. Average accumulated external dose in examined residents with dental enamel formed before 1949 was 74 mGy. In people with enamel formed after 1949, when more than 95% of accumulated dose of external radiation had already been formed, average dose measured by EPR method was 11 mGy. The age at which dental enamel formation completed was determined in accordance with the IAEA Technical document (2002).

Keywords: EPR dosimetry, electron paramagnetic resonance, retrospective dosimetry, tooth enamel, accumulated external dose in population, external irradiation, Semipalatinsk nuclear test site, nuclear test in 1949, radioactive fallout, Dolon, Bodene, Republic of Kazakhstan.

References

1. Stepanenko V.F., Hoshi A., Ivannikov A.I., Bailiff I.K., Zhumadilov K., Skvortsov V.G., Argembaeva R., Tsyb A.F. The 1st Nuclear Test in the former USSR of 29 August, 1949: comparison of individual dose estimates by modeling with EPR retrospective dosimetry and luminescence retrospective dosimetry data for Dolon village, Kazakhstan. *Radiat. Meas.*, 2007, vol. 42, no. 6-7, pp. 1041-1048.
2. Gordeev K., Shinkarev S., Ilyin L., Bouville A., Hoshi M., Luckyanov N., Simon S.L. Retrospective dose assessment for the population living in areas of local fallout from the Semipalatinsk nuclear test site. Part I: External exposure. *J. Radiat. Res.*, 2006, vol. 47, Suppl. A., pp. A129-A136.
3. Stepanenko V.F., Hoshi M., Dubasov Yu.V., Sakaguchi A., Yamamoto M., Orlov M., Bailiff I.K., Ivannikov A.I., Skvortsov V.G., Kryukova I.G., Zhumadilov K.S., Apsalikov K.N., Gusev B.I. A gradient of radioactive contamination in Dolon village near SNTS and comparison of computed dose values with instrumental estimates for the 29 August, 1949 nuclear test. *J. Radiat. Res.*, 2006, vol. 47, Suppl. A., pp. A149-A158.
4. IAEA Report. Use of electron paramagnetic resonance dosimetry with tooth enamel for retrospective dose assessment. Report of a coordinated research project. IAEA-TECDOC-1331, Vienna, 2002.

Zhumadilov K.Sh. – Head of Dept., C. Sc., Tech., Prof. L. Gumilyov ENU of the RK. Ivannikov A.I. – Lead. Res., C. Sc., Phys.-Math.; Stepanenko V.F.* – Head of Lab., D. Sc., Biol., Prof.; Skvortsov V.G. – Head of Lab., C. Sc., Biol.; Galkin V.N. – Director, MD, Prof.; Ivanov S.A. – Deputy Director-General, Head of Dep., MD; Kolyzhenkov T.V. – Sen. Res., C. Sc., Biol.; Akhmedova U.A. – Res.; Bogacheva V.V. – Res. A. Tsyb MRRC. Toyoda Sh. – Prof. Okayama University of Sciences. Endo S. – Prof.; Tanaka K. – Prof.; Hoshi M. – Prof. Hiroshima University. Kaprin A.D. – Director General, Academician of RAS, MD, Prof. NMRC of Radiology.

*Contacts: 4 Korozyov str., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249036. Tel.: (484) 399-70-02; e-mail: mrrc@mrrc.obninsk.ru.

5. **Ivannikov A., Zhumadilov K., Tieliewuhan E., Jiao L., Apsalikov K.N., Berekenova G., Zhumadilov Zh., Toyoda Sh., Miyazawa C., Skvortsov V., Stepanenko V., Endo S., Tanaka K., Hoshi M.** Results of EPR dosimetry for population in the vicinity of the most contaminating radioactive fallout trace after the first nuclear test in the Semipalatinsk Test Site. *J. Radiat. Res.*, 2006, vol. 47, Suppl. A, pp. A39-A46.
6. **Zhumadilov K., Ivannikov A., Apsalikov K.N., Zhumadilov Zh., Toyoda Sh., Tieliewuhan E., Endo S., Tanaka K., Miyazawa C., Okamoto T., Hoshi M.** Radiation dose estimation by tooth enamel EPR dosimetry for residents of Dolon and Bodene. *J. Radiat. Res.*, 2006, vol. 47, Suppl. A, pp. A47-A53.
7. **Fattibene P., Wieser A., Adolfsson E., Benevides L.A., Brai M., Callens F., Chumak V., Ciesielski B., Della Monaca S., Emerich K., Gustafsson H., Hirai Y., Hoshi M., Israelsson A., Ivannikov A., Ivanov D., Kaminska J., Wu Ke, Lund E., Marrale M., Martens L., Miyazawa C., Nakamura N., Panzer W., Pivovarov S., Reyes R.A., Rodzi M., Romanyukha A.A., Rukhin A., Sholom S., Skvortsov V., Stepanenko V., Tarpan M.A., Thierens H., Toyoda S., Trompier F., Verdi E., Zhumadilov K.** The 4th International Comparison on EPR Dosimetry with Tooth Enamel. Part 1: Report on the results. *Radiat. Meas.*, 2011, vol. 46, no. 9, pp. 765-771.
8. **Tielewuhan E., Ivannikov A., Zhumadilov K., Nalapko M., Tikunov D., Skvortsov V., Stepanenko V., Toyoda Sh., Tanaka K., Endo S., Hoshi M.** Spectra processing at tooth enamel dosimetry: analytical description of EPR spectrum at different microwave power. *Radiat. Meas.*, 2006, vol. 41, no. 4, pp. 410-417.
9. **Zhumadilov K.S., Ivannikov A.I., Skvortsov V.G., Zhumadilov Zh.S., Endo S., Tanaka K., Hoshi M.** Tooth enamel EPR dosimetry: selecting optimal spectra registration parameters and effects of sample mass on sensitivity. *J. Radiat. Res.*, 2005, vol. 46, no. 4, pp. 435-442.
10. **Zhumadilov K., Ivannikov A., Apsalikov K., Zhumadilov Zh., Stepanenko V., Skvortsov V., Berekenova G., Toyoda S., Endo S., Tanaka K., Miyazawa C., Hoshi M.** Results of tooth enamel EPR dosimetry for population living in the vicinity of the Semipalatinsk nuclear test site. *Radiat. Meas.*, 2007, vol. 42, no. 6-7, pp. 1049-1052.
11. **Ivannikov A.I., Sanin D., Nalapko M., Skvortsov V.G., Stepanenko V.F., Tsyb A.F., Trompier F., Zhumadilov K., Hoshi M.** Dental enamel EPR dosimetry: comparative testing of the spectra processing methods for determination of Radiation induced-signal amplitude. *Health Phys.*, 2010, vol. 98, no. 2, pp. 345-351.
12. **Ivannikov A.I., Skvortsov V.G., Stepanenko V.F., Zhumadilov K.Sh.** Comparative analysis between radiation doses obtained by epr dosimetry using tooth enamel and established analytical methods for the population of radioactively contaminated territories. *Radiat. Prot. Dosim.*, 2014, vol. 159, no. 1-4, pp. 125-129.
13. **Kaprin A.D., Galkin V.N., Zhavoronkov L.P., Ivanov V.K., Ivanov S.A., Romanko Yu.S.** Synthesis of basic and applied research is the basis of obtaining high-quality findings and translating them into clinical practice. *Radiatsia i Risk – Radiation and Risk*, 2017, vol. 2, no. 2, pp. 26-40. (In Russian).