

**Жумадилов К.Ш.^{1*}, Иванников А.И.², Степаненко В.Ф.²,
Тойода Ш.³, Хоши М.⁴**

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

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

³Университет Науки Окаямы, Япония, Окаяма

⁴Университет Хиросимы, Япония, Хиросима

*e-mail: zhumadilovk@gmail.com

ДОЗИМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАСЕЛЕНИЯ СЕЛА, ПОДВЕРГШЕГОСЯ ОБЛУЧЕНИЮ ПОСЛЕ ИСПЫТАНИЯ 29 АВГУСТА 1949 ГОДА НА СЕМИПАЛАТИНСКОМ ПОЛИГОНЕ

В статье приведены результаты обследования методом ЭПР (электронно-парамагнитный резонанс) дозиметрии по зубной эмали. ЭПР-дозиметрия была использована для определения индивидуальной дозы облучения жителей района, расположенного вблизи следа радиоактивного выпадения осадков вследствие ядерного испытания 29 августа 1949 года, приведшего к загрязнению огромной территории (села Долонь и Бодене, Бескарагайского района, Восточно-Казахстанской области). Поглощенную дозу в эмали определяли по амплитуде радиационно-индуцированного сигнала в эмали, используя калибровочную зависимость. Для получения наилучшей точности определения дозы каждый образец зубной эмали измеряли, по меньшей мере, 4 раза. Индивидуальные избыточные дозы определялись путем вычитания вклада естественного фонового излучения из экспериментальных поглощенных доз. Было показано, что у жителей сел Долонь и Бодене с возрастом формирования эмали до 1949 года, индивидуальные избыточные дозы составляли до 300 мГр, со средним значением 57 ± 36 мГр; Индивидуальные дозы для молодых жителей составляли до 100 мГр, со средним значением 13 ± 10 мГр. В результате исследований жители сел Бодене и Долонь получили максимальную дозу облучения 356 мГр.

Ключевые слова: ЭПР-дозиметрия, зубная эмаль, доза радиации, Семипалатинский испытательный ядерный полигон, Долонь, Бодене

Zhumadilov K.Sh.^{1*}, Ivannikov A.I.², Stepanenko V.F.²,
Toyoda S.³, Hoshi M.⁴

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

²A.F. Tsyb Medical Radiological Research Center, Russia, Obninsk

³Department of Applied Physics Faculty of Science Okayama University of Science, Japan

⁴Hiroshima University, Japan

*e-mail: zhumadilovk@gmail.com

Dosimetry study of exposed population of villages, after the test in August 29, 1949 at the Semipalatinsk test site

The article presents the results of a survey by EPR (Electron Paramagnetic Resonance) dosimetry on tooth enamel. The EPR dosimetry was used to determine individual radiation dose for the residents of the area located close to radioactive fallout trace of the most contaminating nuclear test of 1949 (Dolon and Bodene villages of Beskargai district, East-Kazakhstan oblast). Absorbed dose in enamel was determined

from amplitude of radiation-induced signal in enamel, using measured calibration dependence. For obtaining the best accuracy of dose determination, each tooth enamel samples were measured at least four times. Individual excess doses were determined by subtraction of contribution of natural background radiation from the experimental absorbed doses. It was shown that for residents of Dolon and Bodene having tooth enamel formed before 1949, individual excess doses ranged up to 300 mGy with average value of 57 ± 36 mGy; individual doses for younger residents ranged up to 100 mGy with average value of 13 ± 10 mGy. The Bodene and Dolon villagers studies received the maximum dose 356 mGy.

Key words: EPR dosimetry, tooth enamel, the radiation dose, Semipalatinsk Nuclear Test Site, Dolon, Bodene.

Жумадилов К.Ш.^{1*}, Иванников А.И.², Степаненко В.Ф.²,
Тойода Ш.³, Хоши М.⁴

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

²Ресей Федерациясының Денсаулық сақтау министрлігінің «ФМЗО» Федералдық Мемлекеттік
бюджеттік мекемесінің филиалы А.Ф. Цыб атындағы МРФО, Обнинск

³Окаяма ғылым Университеті, Жапон, Окаяма

⁴Хиросима Университеті, Жапон, Хиросима

*e-mail: zhumadilovk@gmail.com

Семей полигонындағы 29 тамызда 1949 жылғы сынақтан кейін сәулеленуге ұшыраған ауыл тұрғындарын дозиметрлік зерттеу

Мақалада тіс эмальі бойынша дозиметриялау ЭПР (электронды-парамагнитті резонанс) тәсілімен зерттеу нәтижелері келтірілген. ЭПР-дозиметрия ауқымды территорияның ластануына алып келген (Долонь және Бөдене ауылдары, Бесқарағай ауданы, Шығыс Қазақстан облысы) 1949 жылдың 29 тамызындағы ядролық сынақ салдарынан радиоактивті тұнбалар ізінің жанында орналасқан аудан тұрғындарының сәулеленуі жеке мөлшерін анықтау үшін қолданылған. Эмальдағы сіңірілген мөлшерді калибрленген тәуелділікті қолдана отырып, эмальдағы радиациялық-ықпалдандырылған белгі амплитудасы бойынша анықтаған. Мөлшерді дәл анықтау үшін әрбір тіс эмальі үлгісін кем дегенде 4 рет өлшеген. Жеке артық мөлшерлер эксперименттік сіңірілген мөлшерден табиғи фондық сәулелену үлесін алып тастау жолымен анықталған. Долонь және Бөдене ауылдары тұрғындарының жасы келе эмальдің қалыптасуы 1949 жылға дейін жеке артық мөлшерлер 30 мГр, орташа мәнде 57 ± 36 мГр құраған; Жас тұрғындар үшін жеке мөлшерлер 100 мГр дейін, орташа мәнде 13 ± 10 мГр құрағандығы дәлелденген. Зерттеу нәтижесінде Бөдене және Долонь ауылдарының тұрғындары максималды сәулелену мөлшерін 356 мГр алды.

Түйін сөздер: ЭПР-дозиметриясы, радиация дозасы, Семей ядролық сынақ полигоны, Долонь, Бөдене.

Введение

29 августа 1949 года было проведено первое ядерное испытание на «Опытном поле» на территории Семипалатинского испытательного ядерного полигона (СИЯП), которое подвергло радиоактивному загрязнению огромную территорию СИЯП и примыкающие к полигону территории. Последующие ядерные взрывы еще больше повысили уровень радиоактивного загрязнения, которое к тому моменту уже являлось значительным. Взрыв приводил к образованию громадной массы радиоактивной пыли. Данное облако пыли было перенесено ветром и его постепенное оседание образовало след радиоактивного выпадения. Данные о динамике оседания пыли радиоактивного облака в зоне, примыкающей к СИЯП, отсутствуют. Очень трудно восстановить индивидуальные и кол-

лективные дозы облучения местного населения [1-4].

ЭПР-дозиметрия является очень эффективным инструментом для работ по восстановлению полученных доз [5, 6]. Этот метод способен определять дозы облучения даже спустя более 40 лет после облучения. ЭПР измеряет количество стабильных свободных радикалов, образованных вследствие радиационного излучения, в зубной эмали [7-9].

Целью данной работы является определение доз, полученных жителями сел Бодене и Долонь, расположенных вблизи следа радиоактивных выпадений, образованного вследствие самого разрушительного ядерного испытания 1949 года посредством использования метода ЭПР-дозиметрии по образцам зубной эмали, собранных в вышеназванных населенных пунктах [10-15].

Материалы и методы

Отбор образцов. Для проведения данного исследования были измерены образцы 24 зубов, удаленные на основании медицинских показаний у взрослого населения сел Бодене и Долонь, 20 из них были из села Бодене (расположенного к юго-востоку от Долони) и 4 получено из села Долонь. Также, 5 зубов были собраны в ходе обследования населения села Кокпекты (400 км восточнее испытательного полигона), которое не подвергалось радиоактивному облучению. Из 24 зубов из Бодене и Долони, эмаль 19 зубов была сформирована до 1962 г., до окончания испытаний в атмосфере, а эмаль 11 зубов была сформирована до 1949 г., даты первого испытания.

Подготовка образцов. Эмаль механически отделили от дентина, используя твердосплавный бор. Дентин осторожно удалили, охлаждая водой во избежание перегрева образца, провоцирующего образование дополнительного ЭПР-сигнала и значительное изменение формы сигнала [15-17]. Эмаль раздробили кусачками на гранулы диаметром 0,5-1,5 мм. Из каждого зуба были подготовлены по два образца (из щечной и языковой частей каждого зуба).

Калибровочные образцы. Образцы эмали для калибровки доз были подготовлены из коренных зубов, взятых у жителей села Кокпекты, которое не подвергалось радиоактивному воздействию вследствие ядерных испытаний на СИЯП. Образцы эмали для оптимизации параметров измерения были подготовлены из корен-

ных зубов, собранных в стоматологической клинике Университета Хиросимы. Эмали из разных зубов были смешаны и далее были также подготовлены аликвоты массой 100 мг. Аликвоты были облучены по дозам 0, 100, 200, 300 и 500 мГр соответственно источником ^{60}Co в Университете Хиросимы [6-8].

Спектральные ЭПР измерения. Измерения были осуществлены в диапазоне частот X на ЭПР-спектрометре JEOL JES-FA 100 при комнатной температуре 21°C. Спектрометр снабжен цилиндрическим резонатором ТЭ ES-UCX2 с высоким коэффициентом добротности [18, 19]. Были установлены следующие параметры измерения спектров: амплитуда модулирующего сигнала – 0,3 Мт, частота модуляции – 100 кГц, ресивер временной постоянной – 30 мс, время развертки – 30 сек., кадровая развертка – 10 Мт, микроволновая мощность – 2 мВт; число сканирований – 40, время набора спектров – 20 мин. ЭПР обработка спектров проводилась при помощи специально разработанного программного обеспечения [18, 19]

Примеры зависимостей экспериментальных доз от номинальных по результатам, полученным на основе измерений одного спектра, и среднему показателю результатов, полученных на основе четырех измерений спектров, показаны на рис. 1. Квадратичное отклонение было определено для экспериментальных доз, полученных из единичного измерения (SDS) и для средней дозы, полученной из четырех измерений (SDR).

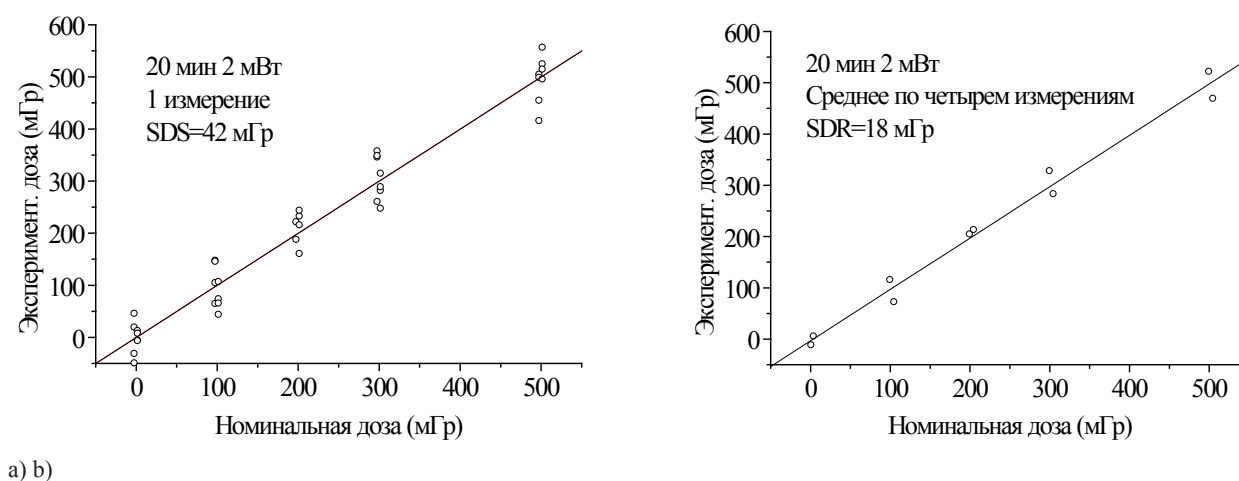


Рисунок 1 – Примеры зависимостей экспериментальных доз от номинальной дозы, при одинарном измерении спектра (а), средние результаты, полученные для четырех повторных измерений спектров (б). Измерения спектров проводят при СВЧ-мощности 2 мВт и времени накопления 20 мин.

Результаты и обсуждение

Продолжительность жизни зубной эмали была рассчитана путем вычитания среднего возраста формирования зуба для конкретного расположения зуба из возраста человека на момент измерения. Возрасты формирования зубной эмали были установлены согласно опубликованным данным [5].

Пробы эмали, собранные у населения села Долонь, были разделены на 2 группы в соответствии с продолжительностью жизни зубной эмали. Первая группа включала жителей с зубной эмалью, сформированной после 1949 года (год проведения первого ядерного взрыва), а вторая группа включала жителей с зубной эмалью, сформированной до 1949 года.

Для всех проб аварийные дозы были рассчитаны посредством уравнения:

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

где D_{en} – поглощенная доза, рассчитанная автоматизированной программой, в мГр; TA – возраст зубной эмали, лет; D_b – фоновая доза облучения, 0,8 мГр/год [19].

Аварийные дозы были обнаружены в диапазоне от $-66,7 \pm 38,67$ до $356 \pm 57,6$ мГр. Пробы, подготовленные из языковых частей всех зубов и щечных частей зубов бокового ряда (5-8) были выбраны для использования при расчете доз. Уникальным источником может быть индивидуальная вариация фонового компонента дозы, который оценивается на основе измерений контрольных образцов, собранных в других деревнях.

Стандартное отклонение определения доз (E_f) было определено по полуэмпирической формуле описанной в предыдущей публикации [12].

Корреляция поглощенной дозы между язычными и щечными частями зубов показана на рис. 2. Среднеквадратичное отклонение поглощенных доз между языковыми и щечными частями находится в рамках среднего значения неопределенности расчета дозы. Систематически повышенные дозы в щечной эмали отсутствуют. Это означает, что эмаль не подвергалась солнечному световому излучению и медицинскому рентгеновскому облучению, за исключением, одной пробы. Данный случай должен быть проанализирован отдельно. Возможно, он на самом деле подвергался рентгеновскому облучению, и необходимо произ-

вести поправку по данной дозе подобно ранее упомянутому случаю.

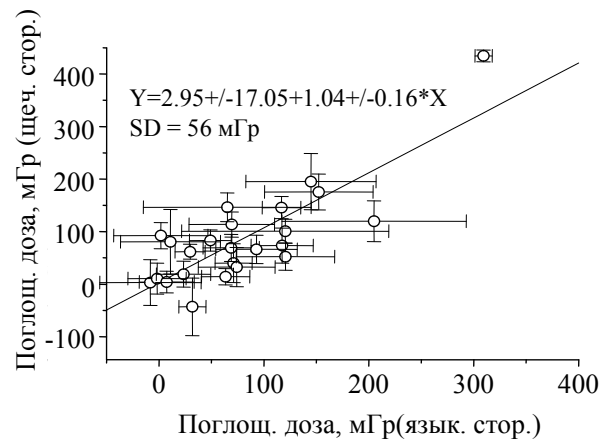


Рисунок 2 – Корреляция поглощенных доз, определенных для эмали с языковой и щечной стороны зубов. Параметры линейной регрессии представлены на панели рисунка. Среднеквадратичное отклонение между языковой и щечной дозами (56 мГр) характеризует точность определения дозы.

На рис. 3 показаны определения индивидуальных аварийных доз для разных возрастов образования эмали. Повышенное значение дозы было определено для одной пробы, образованной до 1949 г. Среднее значение аварийной дозы для эмали до 1949 г. составляет $74,1 \pm 45,5$ мГр (кроме пробы с наивысшей дозой, средняя доза составляет 46 ± 44 мГр), для эмалей, образованной после 1949 года средняя доза составляет $11,53 \pm 37,7$ мГр. Основная часть аварийных доз находятся около порога чувствительности метода.

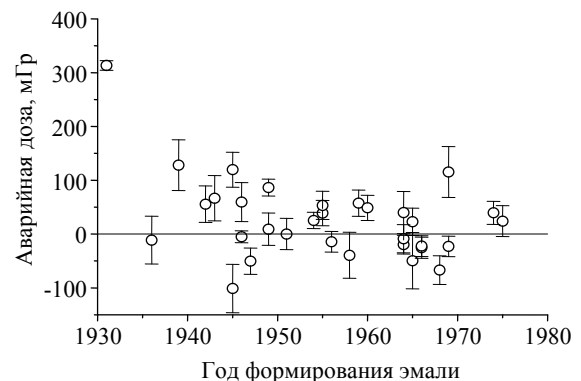


Рисунок 3 – Аварийная доза в эмали для различного возраста формирования эмали.

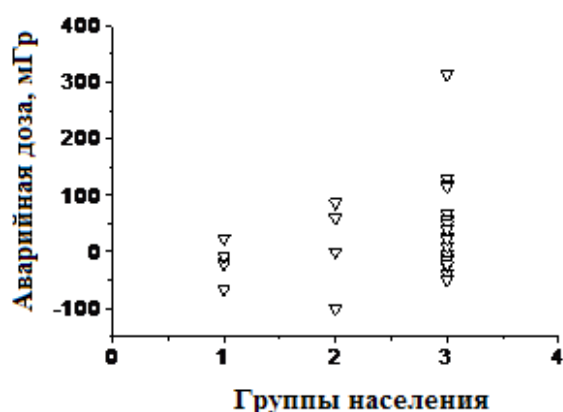


Рисунок 4 – Индивидуальные аварийные дозы, определенные для различных групп населения:
1 – Большевик; 2 – Долонь; 3 – Бодене

Избыточные дозы для разных групп населения представлены на рис. 4. Для контрольных образцов дозы были определены в диапазоне от $-66,7 \pm 38,67$ до $24 \pm 39,31$ мГр, для Бодене от $-50,3 \pm 37,5$ до $356 \pm 57,6$ мГр, и для села Долонь от $0,1 \pm 40,4$ до $115,5 \pm 56,8$ мГр. Диапазон поглощенных доз, определенных для села Долонь, рассчитанных автоматизированной программой, был от $1,7 \pm 51,4$ до $205 \pm 94,5$ мГр. Низкие дозы были обнаружены для группы с эмалью, сформированной после 1962 года, после окончания ядерных испытаний в атмосфере. Значения доз для группы с эмалью, образованной после 1962

г., в соответствии с оценками на основе официальных данных, указывающих на высокие уровни осадков в период с 1949 по 1962 гг. Экспериментально измеренные индивидуальные дозы могут быть сравнены с восстановлением дозы на основе архивных данных, которые составляют 0,4-1,5 Гр для села Долонь. Результаты, полученные посредством ЭПР-дозиметрии ниже в сравнении с результатами восстановления дозы на основе архивных данных, поскольку они выдают информацию об индивидуальных дозах, которые должны быть проанализированы с учетом индивидуального поведения и возможных индивидуальных перемещений.

Заключение

При помощи метода ЭПР-дозиметрии по зубной эмали были восстановлены дозы для жителей двух населенных пунктов, расположенных вблизи наиболее радиоактивного следа после испытания 1949 г. Значение повышенной дозы было определено в одной пробе, с эмалью сформированной после 1949 г. из села Бодене, соответствующей ядерному испытанию 1949 года. Среднее значение дозы было $74,1 \pm 45,5$ мГр по образцам с зубной эмалью, сформированной до 1949 г. Более молодое поколение получило дозу до 100 мГр, со средним показателем $11,5 \pm 37,7$ мГр. Необходимо исследовать больше проб для составления окончательного заключения о ситуации в данном регионе.

Литература

- 1 Deliglasow V.I., Gorin V.V., Maltzev A.L., Matushenko A.M., Safonov F.F. and Smagulov S.G. Radiological situation at Semipalatinsk test site bordering regions of the Kazakh SSR / Bulletin of the Public information center by atomic Energy (CNIИ atominform). Moscow. Russia. – 1991. – 4. – P. 46-52.
- 2 Dubasov U.V., Matushenko A.M., Filonov N.P. Semipalatinsk Test Site: estimation of radiological consequences / Bulletin of the Public information center by atomic Energy (CNIИ atominform). Special issue. Moscow. Russia. – 1993.
- 3 Artemev O.I., Akhmetov M.A., Larin V.N., Ptitskaya L.D., Zhumadilov K.S., Silkina G.P., Subbotin S.B., Radiation survey and radionuclide analysis of radioactive plumes from the former Semipalatinsk nuclear test site / Conference: NATO Advanced Research Workshop on Nuclear Physical Methods in Radioecological Investigations of Nuclear Test Sites. Place: Almaty, Kazakhstan, June 07-10, 1999. Nuclear physical methods in radioecological investigations of nuclear test sites. NATO advanced science institute series, sub-series: Disarmament technologies. – 2000. – 31. – P. 127-143.
- 4 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. – 47. – P. A129-136.
- 5 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.
- 6 Tielewuhun E., Ivannikov A., Zhumadilov K., Nalapkо 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. – 41. – P. 410-417.
- 7 Tanaka K., Endo S., Ivannikov A., Toyoda S., Tieliewuhan E., Zhumadilov K., Miyazawa C., Suga S., Kitagawa K., Hoshi M. Study on influence of X-ray baggage scan on ESR dosimetry for SNTS using human tooth enamel / J. Radiat. Res. – 2006. – 46. – P. 435-442.

- 8 Zhumadilov K., Stepanenko V., Ivannikov A., Zhumadilov Z., Toyoda S., Tanaka K., Endo S. and Hoshi M. Measurement of absorbed doses from X-ray baggage examinations to tooth enamel by means of ESR and glass dosimetry / *Radiat. Environ. Biophys.* – 2008. – 47. – P. 541-545.
- 9 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., Apsalnikov 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. – 47. – P. A149-A158.
- 10 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. – 42. – P. 1041-1048.
- 11 Ivannikov A., Zhumadilov K., Tieliewuhan E., Jiao L., Apsalnikov K.N., Berekenova G., Zhumadilov Zh., Toyoda Sh., Miyazawa C., Skvortsov V., Stepanenko V., Endo S., Tanaka K. and 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. – 47. – P. A39-A46.
- 12 Zhumadilov K., Ivannikov A., Apsalnikov K.N., Zhumadilov Zh., Toyoda Sh., Tieliewuhan E., Endo S., Tanaka K., Miyazawa C., Okamoto T. and Hoshi M. Radiation dose estimation by tooth enamel EPR dosimetry for residents of Dolon and Bodene / *J. Radiat. Res.* – 2006. – 47. – P. A47-A53.
- 13 Zhumadilov K.S., Ivannikov A.I., Skvortsov V.G., Zhumadilov Zh.S., Endo S., Tanaka K. and Hoshi M. Tooth enamel EPR dosimetry: selecting optimal spectra registration parameters and effects of sample mass on sensitivity / *J. Radiat. Res.* – 2005. – 46. – P. 435-442.
- 14 Ivannikov A.I., Trompier F., Gaillard-Lecanu E., Skvortsov V.G. and Stepanenko V.F. Optimization of recording conditions for the electron paramagnetic resonance signal used in dental enamel dosimetry / *Radiat. Prot. Dosim.* – 2002. – 100. – P. 531-538.
- 15 Zhumadilov K., Ivannikov A., Apsalnikov K., Zhumadilov Zh., Stepanenko V., Skvortsov V., Berekenova G., Toyoda S., Endo S., Tanaka K., Miyazawa C. and Hoshi M. Results of tooth enamel EPR dosimetry for population living in the vicinity of the Semipalatinsk nuclear test site / *Radiat. Meas.* – 2007. – 42. – P. 1049-1052.
- 16 Ivannikov A.I., Sanin D., Nalapko M., Skvortsov V.G., Stepanenko V.F., Tsyb A.F., Trompier F., Zhumadilov K., and Hoshi M. Dental enamel EPR dosimetry: comparative testing of the spectra processing methods for determination of Radiation induced-signal amplitude. / *Health Phys.* – 2010. – 98. – P. 345-351.
- 17 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. – 159. – P. 125-129.
- 18 Zhumadilov K., Ivannikov A., Zhumadilov Z., Stepanenko V., Apsalnikov K., Rodzi M., Zhumadilova A., Toyoda S., Endo S., Tanaka K., Okamoto T. and Hoshi M. ESR dosimetry study on population of settlements nearby Ust-Kamenogorsk city, Kazakhstan / *Radiat. Environ. Biophys.* – 2009. – 48. – P. 419-425.
- 19 Zhumadilov K., Ivannikov A., Stepanenko V., Toyoda S., Zhumadilov Z. and Hoshi M. ESR dosimetry study of population in the vicinity of the Semipalatinsk Nuclear Test Site / *J. Radiat. Res.* – 2013. – 54. – P. 775-779.

References

- 1 V.I. Deliglasow, V.V. Gorin, A.L. Maltzev, A.M. Matusheenko, F.F. Safonov and S.G. Smagulov, Bulletin of the Public information center by atomic Energy (CNII atominform). Moscow, Russia, 4, 46-52, (1991).
- 2 U.V. Dubasov, A.M. Matuschenko, and N.P. Filonov, Bulletin of the Public information center by atomic Energy (CNII atominform). Moscow, Russia, Special issue, (1993).
- 3 O.I. Artemev, M.A. Akhmetov, V.N. Larin, L.D. Ptitskaya, K.S. Zhumadilov, G.P. Silkina, and S.B. Subbotin, Conf. NATO Advanced Research Workshop on Nuclear Physical Methods in Radioecological Investigations of Nuclear Test Sites. (Almaty, Kazakhstan, June 07-10, 1999). Nuclear physical methods in radioecological investigations of nuclear test sites. NATO advanced science institute series, sub-series: Disarmament technologies, 31, 127-143, (2000).
- 4 K. Gordeev, S. Shinkarev, L. Ilyin, A. Bouville, M. Hoshi, N. Luckyanov, and S.L. Simon, *J. Radiat. Res.* 47, A129-136, (2006).
- 5 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).
- 6 E. Tielewuhan, A. Ivannikov, K. Zhumadilov, M. Nalapko, D. Tikunov, V. Skvortsov, V. Stepanenko, Sh. Toyoda, K. Tanaka, S. Endo, and M. Hoshi, *Radiat. Meas.* 41, 410-417, (2006).
- 7 K. Tanaka, S. Endo, A. Ivannikov, S. Toyoda, E. Tieliewuhan, K. Zhumadilov, C. Miyazawa, S. Suga, K. Kitagawa, and M. Hoshi, *J. Radiat. Res.* 46, 435-442, (2006).
- 8 K. Zhumadilov, V. Stepanenko, A. Ivannikov, Z. Zhumadilov, S. Toyoda, K. Tanaka, S. Endo, and M. Hoshi, *Radiat. Environ. Biophys.* 47, 541-545, (2008).
- 9 V.F. Stepanenko, M. Hoshi, Yu.V. Dubasov, A. Sakaguchi, M. Yamamoto, M. Orlov, I.K. Bailiff, A.I. Ivannikov, V.G. Skvortsov, I.G. Kryukova, K.S. Zhumadilov, K.N. Apsalnikov, and B.I. Gusev, *J. Radiat. Res.* 47, A149-A158, (2006).
- 10 V.F. Stepanenko, A., Hoshi, A.I. Ivannikov A.I., I.K. Bailiff, K. Zhumadilov, V.G. Skvortsov, R. Argembaeva, and A.F. Tsyb, *Radiat. Meas.* 42, 1041-1048, (2007).

- 11 A. Ivannikov, K. Zhumadilov, E. Tieliewuhan, L. Jiao, K.N. Apsalikov, G. Berekenova, Zh. Zhumadilov, Sh. Toyoda, C. Miyazawa, V. Skvortsov, V. Stepanenko, S. Endo, K. Tanaka and M. Hoshi, *J. Radiat. Res.* 47, A39-A46, (2006).
- 12 K. Zhumadilov, A. Ivannikov, K.N. Apsalikov, Zh. Zhumadilov, Sh. Toyoda, E. Tieliewuhan, S. Endo, K. Tanaka, C. Miyazawa, T. Okamoto, and M. Hoshi, *J. Radiat. Res.* 47, A47-A53, (2006).
- 13 K.S. Zhumadilov, A.I. Ivannikov, V.G. Skvortsov, Zh.S. Zhumadilov, S. Endo, K. Tanaka and M. Hoshi, *J. Radiat. Res.* 46, 435-442, (2005).
- 14 A.I. Ivannikov, F. Trompier, E. Gaillard-Lecanu, V.G. Skvortsov, and V.F. Stepanenko, *Radiat. Prot. Dosim.* 100, 531-538, (2002).
- 15 K. Zhumadilov, A. Ivannikov, K. Apsalikov, Zh. Zhumadilov, V. Stepanenko, V. Skvortsov, G. Berekenova, S. Toyoda, S. Endo, K. Tanaka, C. Miyazawa, and M. Hoshi, *Radiat. Meas.* 42, 1049-1052, (2007).
- 16 A.I. Ivannikov, D. Sanin, M. Nalapko, V.G. Skvortsov, V.F. Stepanenko, A.F. Tsyb, F. Trompier, K. Zhumadilov, and M. Hoshi, *Health Phys.* 98, 345-351, (2010).
- 17 A.I. Ivannikov, V.G. Skvortsov, V.F. Stepanenko, and K.Sh. Zhumadilov, *Radiat. Prot. Dosim.* 159, 125-129, (2014).
- 18 K. Zhumadilov, A. Ivannikov, Z. Zhumadilov, V. Stepanenko, K. Apsalikov, M. Rodzi, A. Zhumadilova, S. Toyoda, S. Endo, K. Tanaka, T. Okamoto, and M. Hoshi, *Radiat. Environ. Biophys.* 48, 419-425, (2009).
- 19 K. Zhumadilov, A. Ivannikov, V. Stepanenko, S. Toyoda, Z. Zhumadilov, and M. Hoshi, *J. Radiat. Res.* 54, 775-779, (2013).