РАЗДЕЛ 1**НАУЧНЫЕ СТАТЬИ**

DOI: 10.21870/0131-3878-2016-25-3-14-23

Кросс-верификация доз облучения ликвидаторов аварии на Чернобыльской АЭС по данным ЭПР-дозиметрии и официальным дозиметрическим талонам Национального радиационно-эпидемиологического регистра**Иванов В.К., Скворцов В.Г., Иванников А.И., Туманов К.А., Максютлов М.А.**

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

В работе впервые описывается кросс-верификация доз облучения ликвидаторов аварии на Чернобыльской АЭС по данным ЭПР-дозиметрии, выполненной в Медицинском радиологическом научном центре им. А.Ф. Цыба, и дозиметрическим талонам Национального радиационно-эпидемиологического регистра. Полученные данные свидетельствуют о принадлежности части когорты ликвидаторов по лучевым нагрузкам к слабо изученному в области радиологической защиты интервалу малых доз облучения (до 250 мЗв). Установлено, что отличие в дозовых оценках ЭПР-дозиметрии и официальных данных Национального регистра максимально в диапазоне доз облучения [0-50 мЗв] (отношения – 6,4), для диапазона доз облучения 50 мЗв и более имеет место достаточно хорошее согласие (отношения – 0,8). Эти данные имеют важное значение при планировании дальнейших радиационно-эпидемиологических исследований по когорте ликвидаторов в Национальном регистре. Предложена технология реконструкции доз облучения ликвидаторов, для которых отсутствуют дозиметрические талоны в Национальном регистре. Технология реконструкции доз позволит существенно повысить статистическую мощность эпидемиологических исследований по когорте ликвидаторов. С целью минимизации влияния факторов неопределённости необходимо продолжить кросс-верификацию доз облучения ликвидаторов аварии на Чернобыльской АЭС по данным ЭПР-дозиметрии и официальным дозиметрическим талонам Национального радиационно-эпидемиологического регистра.

Ключевые слова: кросс-верификация, дозы облучения, ликвидаторы, авария на Чернобыльской АЭС, ЭПР-дозиметрия, Национальный радиационно-эпидемиологический регистр (НРЭР), дозиметрические талоны, поглощённая доза, индивидуальная доза, реконструкция доз облучения.

В настоящее время Национальный радиационно-эпидемиологический регистр (НРЭР) включает индивидуальные медико-дозиметрические данные на 196644 участника ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС. Среди них имеется информация о дозах облучения на 135698 человек (69,0% от всей численности). Средняя доза облучения ликвидаторов составляет 107 мЗв, причём для ликвидаторов 1986 г. – 149 мЗв, 1987 г. – 89 мЗв, 1988 г. – 35 мЗв, 1989 г. – 34 мЗв и 1990 г. – 39 мЗв. Дозы (0, 50] мЗв получили 47803 ликвидатора, (50, 100] – 34662 ликвидатора, (100, 150] – 11351 ликвидатор, (150, 200] – 15662 ликвидатора, (200, 250] – 22919 ликвидаторов и (250 +) – 3301 ликвидатор.

Иванов В.К.* – Председатель РНКРЗ, зам. директора по научн. работе, чл.-корр. РАН; **Скворцов В.Г.** – зав. лаб., к.б.н.; **Иванников А.И.** – вед. научн. сотр., к.ф.-м.н.; **Туманов К.А.** – зав. лаб., к.б.н.; **Максютлов М.А.** – зав. лаб., к.т.н. МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России.

*Контакты: 249036, Калужская обл., Обнинск, ул. Королева, 4. Тел.: (484) 399-33-90; e-mail: nrer@obninsk.com.

За 30 лет после аварии на Чернобыльской АЭС по когорте ликвидаторов были опубликованы фундаментальные научные исследования, посвящённые оценке радиационных рисков онкологических и неонкологических заболеваний, подготовлены специальные документы НКДАР ООН [1].

После атомной бомбардировки в 1945 г. городов Хиросима и Нагасаки в течение последующих 70 лет были выполнены крупномасштабные радиационно-эпидемиологические исследования, результаты которых положены в основу существующих международных стандартов радиационной безопасности. Вместе с тем, следует подчеркнуть, что средняя доза облучения в когорте LSS (Хиросима – Нагасаки) составила 220 мЗв, т.е. существенно превышала среднюю дозу облучения ликвидаторов.

По степени надёжности дозиметрические данные для ликвидаторов можно разделить на три основные группы в зависимости от использованного метода оценки доз [2]:

- экспозиционная или поглощённая доза, полученная с использованием индивидуального дозиметра – максимальная погрешность около 50% при условии правильного его использования;
- групповая доза, приписанная лицам, входившим в группу, которая выполняла какую-либо работу в зоне, по показаниям индивидуального дозиметра, находившегося у одного из членов группы – максимальная неопределённость дозы по группе могла достигать 300%;
- маршрутная доза, которая оценивалась по средней мощности экспозиционной дозы в зоне проведения работ и времени пребывания в ней группы лиц – максимальная неопределённость дозы по группе могла достигать 500%.

Поскольку в нашем случае речь впервые идёт о проблеме оценки радиационных рисков при малых дозах облучения (до 200 мЗв) крайне актуальным остаётся вопрос о качестве и факторах неопределённости в дозиметрических данных по когорте ликвидаторов.

В дозиметрическом талоне Национального радиационно-эпидемиологического регистра не отражена методика оценки доз облучения ликвидаторов. Поэтому крайне важным является реализация процедуры кросс-верификации доз облучения ликвидаторов по данным ЭПР-дозиметрии и официальным дозиметрическим данным Национального регистра.

Определение индивидуальных доз методом ЭПР

Известно, что под влиянием ионизирующего излучения в эмали зубов образуются стабильные радиационно-индуцированные (РИ) парамагнитные центры, которые накапливаются в течение всего периода существования эмалевой коронки зуба. Сигнал от этих центров можно зарегистрировать методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). По интенсивности этого сигнала, на основе калибровочных зависимостей, можно определить поглощённую дозу в эмали, исходя из которой можно определить индивидуальную дозу. В этом заключается сущность метода ЭПР-дозиметрии по эмали зубов.

Приготовление образцов эмали, измерение спектров ЭПР и определение поглощённой дозы в эмали производили в соответствии со стандартизированной методикой МРНЦ. Этот подход был апробирован неоднократно в ходе международных интерсличений и был принят в качестве стандартизированной методики для всех рутинных измерений, проводимых в МРНЦ. Подробное описание и обоснование использованного методологического подхода приведено в предыдущих публикациях [3-5]. Методика отвечает требованиям российского стандарта

(ГОСТ Р22/3/04-96), международного стандарта (ISO 13304:2013) и рекомендациям МАГАТЭ (IAEA-TECDOC-1331: 2002).

Эмаль отделяли от дентина с помощью зубоорачебных боров. По интенсивности стабильного (РИ) сигнала ЭПР определяли дозу, поглощённую в эмали. Калибровку проводили на источнике гамма-излучения кобальт-60 в соответствии с показаниями тканеэквивалентного дозиметра. Оптимальная масса образца для измерений составляла 100-120 мг. Погрешность определения дозы для таких образцов составляла 30-50 мГр в области доз до 500 мГр и 10% при более высоких дозах. Для образцов с меньшей массой (минимальная допустимая масса 20-30 мг) погрешность более высокая, примерно обратно пропорционально массе. Индивидуальную дозу получали после вычитания вклада естественного фонового радиоактивного излучения интенсивностью 0,8 мГр в год и возраста эмали, определяемого исходя из возраста пациента на момент измерений и возраста формирования эмалевой коронки, зависящей от типа зуба [3-5]. Поправку на энергетическую зависимость радиационной чувствительности эмали не производили, поскольку не известен спектр действующего излучения.

Образцы зубов получали при удалении зубов по медицинским показаниям в основном в процессе специализированной медицинской диспансеризации, проводимой на базе МРНЦ для ликвидаторов. Были получены образцы для ликвидаторов, проживающих в основном в Калужской, Брянской и Ростовской областях. Образцы использовали с согласия пациента. При этом записывали информацию о донорах образцов в специальных сопровождающих формах, заполняемых при удалении. В формах указывали ФИО пациента, дату рождения, адрес места жительства, период участия в ЛПА, место работы. Указывали также тип зуба в соответствии с его позицией в челюсти. Сбор образцов и их анализ методом ЭПР производили в период 1992-2002 гг.

В начальный период проведения исследования при сборе образцов не отмечали информацию о типе зуба. Впоследствии было выяснено, что под влиянием УФ компонента солнечного света во внешней стороне эмали зубов передней части челюсти (позиции зубов 1-3) формируется стабильный ЭПР сигнал, сходный с РИ сигналом [3]. Использование таких образцов для анализа методом ЭПР приводит к завышенной оценке дозы. При последующем сборе образцов, после 1995 г., стали отмечать информацию о типе зуба в соответствии с его позицией и стали использовать для анализа только эмаль зубов боковой части челюсти (премоляры и моляры).

Таким образом, были проведены измерения для 78 образцов эмали, из них только для 45 образцов известно, что тип зубов соответствует боковой части челюсти, и для них дозы ЭПР определены правильно. Для остальных 33 образцов позиции зуба неизвестны, среди них могут быть как боковые зубы, для которых дозы определены правильно, так и передние зубы, для которых дозы могут быть завышены.

Кросс-верификация доз облучения

В Национальный радиационно-эпидемиологический регистр были представлены данные на 78 ликвидаторов, прошедших в МРНЦ им. А.Ф. Цыба ЭПР-дозиметрию после аварии на Чернобыльской АЭС. Из этих 78 человек были зарегистрированы в НРЭР 66 ликвидаторов, из которых только у 35 человек имелись официальные дозиметрические талоны с полученной дозой облучения.

На рис. 1 показана зависимость отношения средних доз ЭПР-дозиметрии к средним дозам НРЭР ($D_{\text{эпр_сред}}/D_{\text{нрэр_сред}}$) от доз НРЭР по дозовым интервалам. Среднее из отношений по всем дозовым группам составляет 1,7, т.е. в среднем дозы ЭПР-дозиметрии выше доз НРЭР на 70%. Максимальное отличие установлено в диапазоне доз НРЭР 0-50 мЗв. Как было отмечено выше, средняя доза облучения ликвидаторов по данным НРЭР составляет 107 мЗв. Проведённая кросс-верификация показывает, что даже с учётом погрешностей в оценке доз НРЭР, лучевая нагрузка на ликвидаторов остаётся в диапазоне малых доз облучения (до 200 мЗв), что имеет принципиальное значение для планирования и реализации эпидемиологических исследований и выработке на этой основе рекомендаций по радиологической защите.

Рис. 1. Зависимость отношения средних доз ЭПР-дозиметрии к средним дозам НРЭР по дозовым интервалам.

Реконструкция доз облучения

Как было отмечено выше, у 66 ликвидаторов, зарегистрированных в НРЭР, для 35 человек имелись официальные дозы облучения и для 31 человека данные дозиметрии отсутствовали. В НРЭР была реализована технология реконструкции доз облучения для этих ликвидаторов. Для этого были получены средние дозы облучения в день с 26.04.1986 г. по 31.12.1990 г. по когорте ликвидаторов, у которых имелись дозиметрические талоны в Регистре с указанием доз внешнего облучения. Дозиметрические данные были сгруппированы по региональному сегменту НРЭР, полу и 5-летним возрастным интервалам.

На рис. 2 показана, в частности, вариабельность суточных доз облучения в 1986 г. для ликвидаторов из различных региональных сегментов НРЭР.

На рис. 3 показана динамика среднесуточной дозы для разных возрастных групп и периода пребывания в 30-км зоне.

Рис. 2. Вариабельность суточных доз облучения ликвидаторов в 1986 г. для различных региональных сегментов НРЭР.

В ряде опубликованных радиационно-эпидемиологических исследований по когорте ликвидаторов было показано, что к группе повышенного риска (онкологические и неонкологические заболевания) следует отнести ликвидаторов, получивших дозы облучения более 150 мЗв [1]. Динамика среднесуточных доз для этой группы ликвидаторов показана на рис. 4. Легко заметить, что среднесуточная доза в группе повышенного риска в 1986-1988 гг. превышала 1 мЗв.

Рис. 3. Динамика среднесуточной дозы для различных возрастных групп и периода пребывания в 30-км зоне.

Рис. 4. Среднесуточные дозы облучения у ликвидаторов из группы повышенного риска, для которых доза облучения превышала 150 мЗв.

Рис. 5. Зависимость отношения средних доз ЭПР-дозиметрии к средним реконструированным дозам НРЭР по дозовым интервалам.

Из 31 ликвидатора, прошедшего ЭПР-дозиметрию, для 28 удалось восстановить их принадлежность к указанным выше группам. Зная время их пребывания в 30-км зоне, были реконструированы дозы внешнего облучения. На рис. 5 показана зависимость отношения средних доз ЭПР-дозиметрии к средним реконструированным дозам НРЭР. Среднее из отношений по всем дозовым группам составляет 2,2.

Выводы

1. Впервые реализована технология кросс-верификации доз облучения ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС по данным ЭПР-дозиметрии, выполненной в Медицинском радиологическом научном центре им. А.Ф. Цыба, и официальным дозиметрическим талонам Национального радиационно-эпидемиологического регистра (63 человека).

2. Данные ЭПР-дозиметрии и Национального регистра свидетельствуют о принадлежности части когорты ликвидаторов по лучевым нагрузкам к слабо изученному в области радиологической защиты интервалу малых доз облучения (до 250 мЗв), что дополнительно подтверждает актуальность проведения в дальнейшем эпидемиологических исследований по определению зависимости «доза-эффект».

3. Установлено, что отличие дозовых оценок ЭПР-дозиметрии и официальных данных Национального регистра максимально в диапазоне доз облучения [0-50 мЗв] (отношения – 6,4). Для диапазона доз облучения 50 мЗв и выше имеет место достаточно хорошее согласие

(отношения – 0,8). Эти данные имеют важное значение при планировании дальнейших радиационно-эпидемиологических исследований когорты ликвидаторов, выполняемых в Национальном регистре.

4. Предложена технология реконструкции доз облучения ликвидаторов, для которых отсутствуют дозиметрические талоны в Национальном регистре. Технология позволит существенно повысить статистическую мощность эпидемиологических исследований ликвидаторов.

5. С целью минимизации влияния факторов неопределённости необходимо продолжить кросс-верификацию доз облучения ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС по данным ЭПР-дозиметрии и официальным дозиметрическим талонам Национального радиационно-эпидемиологического регистра.

Литература

1. Медицинские радиологические последствия Чернобыля: прогноз и фактические данные спустя 30 лет //Под общей ред. чл.-корр. РАН В.К. Иванова, чл.-корр. РАН А.Д. Каприна. М.: ГЕОС, 2015. 450 с.
2. **Иванов В.К., Цыб А.Ф., Иванов С.И.** Ликвидаторы чернобыльской катастрофы: радиационно-эпидемиологический анализ медицинских последствий. М.: «Галанис», 1999. 312 с.
3. **Ivannikov A.I., Skvortsov V.G., Stepanenko V.F., Tikunov D.D., Fedosov I.M., Romanyukha A.A., Wieser A.** Wide scale EPR retrospective dosimetry. Results and problems //Radiat. Prot. Dosim. 1997. V. 71. P. 175-180.
4. **Ivannikov A.I., Skvortsov V.G., Stepanenko V.F., Tsyb A.F., Khamidova L.G., Tikunov D.D.** Tooth enamel EPR dosimetry: Sources of errors and their correction //Appl. Radiat. Isot. 2000. V. 52. P. 1291-1296.
5. **Skvortsov V.G., Ivannikov A.I., Stepanenko V.F., Tsyb A.F., Khamidova L.G., Kondrashov A.E., Tikunov D.D.** Application of EPR retrospective dosimetry for large-scale accidental situation //Appl. Radiat. Isot. 2000. V. 52. P. 1275-1282.

Radiation doses to Chernobyl liquidators: cross-verification of official doses used at the National Radiation Epidemiological Registry in accordance with dose values estimated with EPR dosimetry technique

Ivanov V.K., Skvortsov V.G., Ivannikov A.I., Tumanov K.A., Maksioutov M.A.

A. Tsyb MRRC, Obninsk

Results of cross-verification of official radiation doses to Chernobyl liquidators used at the National Radiation Epidemiological Registry (NRER) in accordance with dose values estimated with EPR dosimetry technique at A. Tsyb Medical Radiological Research Centre (A. Tsyb MRRC) are described in this work. The obtained results demonstrate that doses to liquidators are in the range of low doses (<250mSv), their health effects are still poorly known. The highest difference in dose values, official and EPR estimated (ratio 6.4), is within dose range of 0-50 mSv, the official doses above 50 mSv are in reasonably good agreement with estimated doses (ratio 0.8). The obtained data are very important and should be taken into account when planning further radiation epidemiological studies of the cohort of liquidators. The new technique, EPR dosimetry, is offered for reconstruction of radiation dose to liquidators who do not have official dose records. It will also give the opportunity for increasing statistical power of radiation epidemiological cohort studies and reducing impact of uncertainty factors. The obtained results allow authors to recommend continuation of cross-verification of officially recorded doses to liquidators in accordance with EPR estimated doses.

Key words: *cross-verification, radiation doses, liquidators, Chernobyl accident, EPR dosimetry, National Radiation and Epidemiological Registry (NRER), dosimetric forms, absorbed dose, individual dose, reconstruction of radiation doses.*

Ivanov V.K.* – Deputy Director, Chairman of RSCR, Corresponding Member of RAS; **Skvortsov V.G.** – Head of Lab., C. Sc., Biol.; **Ivannikov A.I.** – Lead. Researcher, C. Sc., Phys.-Math.; **Tumanov K.A.** – Head of Lab., C. Sc., Biol.; **Maksioutov M.A.** – Head of Lab., C. Sc., Tech. A. Tsyb MRRC.

*Contacts: 4 Korolyov str., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249036. Tel.: (484) 399-33-90; e-mail: nrer@obninsk.com.

References

1. *Health effects of Chernobyl: prediction and actual data 30 years after the accident*. Eds.: Corresponding Member of RAS Ivanov V.K., Corresponding Member of RAS Kaprin A.D. Moscow, GEOS, 2015. 450 p. (In Russian).
2. **Ivanov V.K., Tsyb A.F., Ivanov S.I.** *Liquidators of the Chernobyl accident: radiation and epidemiological analysis of medical consequences*. Moscow, Galanis Publ., 1999. 312 p. (In Russian).
3. **Ivannikov A.I., Skvortsov V.G., Stepanenko V.F., Tikunov D.D., Fedosov I.M., Romanyukha A.A., Wieser A.** Wide scale EPR retrospective dosimetry. Results and problems. *Radiat. Prot. Dosim.*, 1997, vol. 71, pp. 175-180.
4. **Ivannikov A.I., Skvortsov V.G., Stepanenko V.F., Tsyb A.F., Khamidova L.G., Tikunov D.D.** Tooth enamel EPR dosimetry: Sources of errors and their correction. *Appl. Radiat. Isot.*, 2000, vol. 52, pp. 1291-1296.
5. **Skvortsov V.G., Ivannikov A.I., Stepanenko V.F., Tsyb A.F., Khamidova L.G., Kondrashov A.E., Tikunov D.D.** Application of EPR retrospective dosimetry for large-scale accidental situation. *Appl. Radiat. Isot.*, 2000, vol. 52, pp. 1275-1282.