

Определение оптимального времени использования термолюминесцентных дозиметров при ведении индивидуального дозиметрического контроля с помощью термолюминесцентной дозиметрической автоматизированной системы Harshaw

Проведен эксперимент по измерению скорости накопления дозы дозиметрами типа 0110 Harshaw в количестве 120 штук на протяжении трех месяцев. Выявлено, что измерения накопленной дозы дозиметров, прошедших отжиг, дают не нулевой результат, а составляют порядка 0,1 мЗв. Последующие измерения остальных дозиметров показали, что скорость набора дозы составляет порядка $0,00344 \pm 0,00025$ мЗв/сутки, что не соответствует показаниям МКС-АТ1117М $0,0046 \pm 0,0009$ мЗв/сутки. Выдвинуто предположение, что необходимо учитывать выявленный эффект при определении индивидуального эквивалента дозы внешнего облучения нижней части живота для женщин репродуктивного возраста или использовать иной способ определения данной величины.

Ключевые слова:

термолюминесцентный дозиметр, индивидуальный дозиметрический контроль, индивидуальный эквивалент дозы, автоматизированная термолюминесцентная дозиметрическая система Harshaw, двухэлементные дозиметры типа 0110.

А.А.Коваленко¹,

М.М.Балачков², Е.А.Юрченко²

¹ Филиал АО «Концерн Росэнергоатом»

«Ленинградская атомная станция», г. Сосновый бор Ленинградской обл.

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

На всех атомных станциях России на данный момент для ведения индивидуального дозиметрического контроля используются термолюминесцентные дозиметры. Особенность данных дозиметров заключается в том, что они являются «накопительными», и их использование на короткий промежуток времени (менее одного месяца) нецелесообразно из-за высокой нижней границы регистрируемой дозы в 100 мкЗв. Термолюминесцентные дозиметры (далее – ТЛД) предполагают использование в течение длительного периода, но в реальных условиях это в ряде случаев невозможно. Так, например, согласно НРБ-99/2009 [1] для женщин

репродуктивного возраста необходимо контролировать эквивалентную дозу внешнего облучения на нижней части живота каждый месяц. При использовании системы Harshaw с дозиметрами типа 0110 на короткий срок наблюдаются «набросы доз». Под «набросом доз» в данной работе понимаются завышенные результаты измерения индивидуальных эквивалентов доз ТЛД. Детекторы дозиметров типа 0110 изготовлены из LiF, который обладает рядом преимуществ, хорошо отраженных в [2]. Основной особенностью этого материала является тканеэквивалентность к фотонному излучению, а точнее, близость по эффективному атомному номеру к биологической ткани.

В одной партии дозиметров даже при условии максимальной стандартизации могут иметься различия между детекторами по массе, толщине и оптическим свойствам. В работе [3] отмечены несколько факторов, которые вносят основной вклад в погрешность термолюминесцентных дозиметров при измерении индивидуального эквивалента дозы, а именно: разброс уровня собственного фона детекторов, разброс калибровочных коэффициентов дозиметров в партии относительно среднего и изменение чувствительности детекторов при длительной эксплуатации.

В [4] проведен обширный эксперимент по тестированию дозиметров типа 7776 Harshaw для проверки термолюминесцентной системы по всем критериям ИЕС 61066, и система признана удовлетворяющей всем требованиям. ИЕС 61066 – это международный стандарт, который устанавливает метрологические и технические требования к термолюминесцентным дозиметрическим системам для индивидуального дозиметрического контроля и мониторинга окружающей среды. В [5] проведено сравнение систем Harshaw и Дозы-ТЛД, у дозиметров обеих систем достаточно точная сопоставимость результатов, но у системы

Harshaw выделен ряд преимуществ, такие как: возможность определения дозы от бета-излучения $H\beta(0,07)$ в коже одновременно с $H\beta(10)$ облучения всего тела, высокая скорость измерения (40 секунд один двухэлементный детектор), долговременное использование дозиметрических детекторов благодаря защите от различных повреждений с помощью тефлоновой подложки.

Материалы и методы

Для эксперимента использовалась автоматизированная термолюминесцентная система Harshaw 6600 Lite с дозиметрами 0110/8814, которые представляют собой детектор с двумя термолюминесцентными элементами, изготовленными из LiF(Mg,Ti), предназначенными для измерения $H\beta(0,07)$ бета-излучения в коже и $H\beta(10)$ гамма-излучения всего тела [6].

Опытным путем установлено, что сумма показаний трех термолюминесцентных дозиметров, измеренных последовательно в течение трех месяцев, не равна показанию дозиметра, который измерили в конце этих трех месяцев. Стоит отметить, что на значение индивидуального эквивалента дозы может повлиять множество факторов, например, загрязненность детекторов; кроме того, при воздействии на детектор повышенной освещенности возникает фотолюминесценция, а также при механических воздействиях триболюминесценция и хемилюминесценция [7].

Из партии дозиметрических детекторов модели 0110 Harshaw отобраны случайным образом 120 детекторов, отжиг дозиметров производился 31.01.2024, последний день замера 13.05.2024. В помещении, где проводился эксперимент, фон составлял в среднем 0,19 мкЗв/ч. Измерения фона производились прибором МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКГ-05.

Определение оптимального времени между отжигом и измерением термoluminescentного дозиметра 0110 Harshaw

В рамках эксперимента поставлена цель установления времени, необходимого для выдержки дозиметра перед измерением. В течение трех месяцев три раза в неделю производились измерения трех дозиметрических слайдов 0110 Harshaw. Затем рассчитывались показания фона в помещении на данный момент времени и производилось вычитание фоновых значений из измеренных. Из трех полученных значений вычислялось среднее.

Обработка производилась в предположении, что измеренные величины подчиняются нормальному закону распределения. Доверительная вероятность принималась равной 0,95.

Из расчета фона на основании измерения прибором МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКТ-05 мощности амбиентного эквивалента дозы ожидается, что наклон (мощность дозы) будет $0,0046 \pm 0,0009$ мЗв/сутки. По результатам измерения индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ от гамма-излучения без вычета фона был получен результат $0,00344 \pm \pm 0,00025$ мЗв/сутки (рис.1). Если вычесть фон

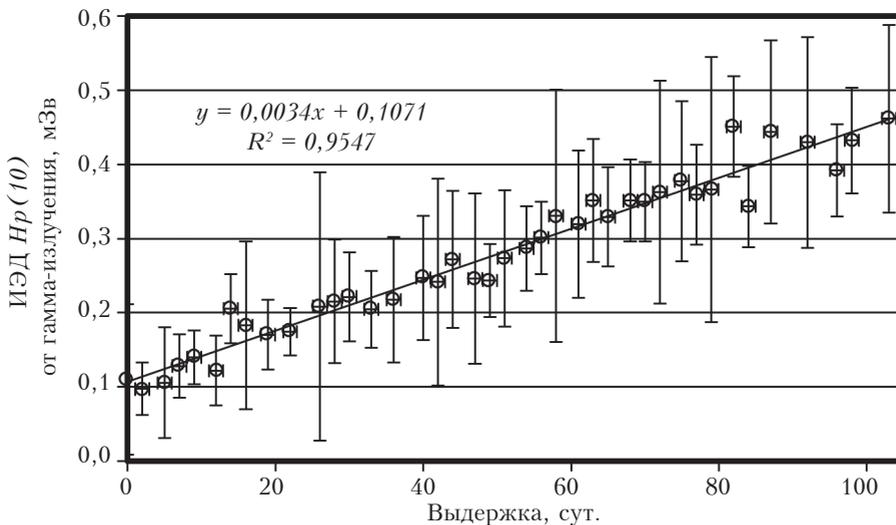


Рис.1. Показания дозиметров в зависимости от времени выдержки.

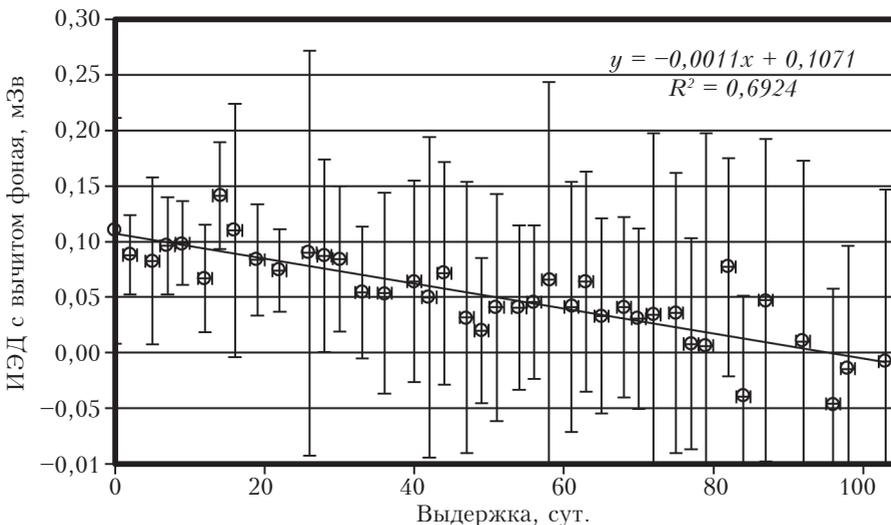


Рис.2. Зависимость показаний дозиметров после вычета фона от времени выдержки.

из измеренного значения, то можно сказать, что «собственная доза» у дозиметра 0110 спадает со скоростью $0011 \pm 0,0009$ мЗв/сут.

Значения ИЭД с каждым месяцем увеличивается, это объясняется тем, что дозиметры лежали в помещении с фоном, равным $0,19$ мкЗв/ч, соответственно в течении месяца накопили в себе некоторую дозу. Также видно, что значения ИЭД у только что отожженных дозиметров равны не нулю, а составляют порядка $0,1$ мЗв.

Далее из показания дозиметров поточечно вычитался фон. Результаты приведены на рис.2.

На рис.2 видно, что чем позже проводятся измерения, тем больше точки приближаются к нулевому значению. Таким образом, экспонирование (под экспонированием понимается выдерживание дозиметров некоторое время при фоновых значениях мощности дозы без выдачи персоналу) дозиметрических слайдов в течение трех месяцев необходимо для того, чтобы накопить достаточное количество информации о полученной дозе и получить более точные результаты измерений.

Доверительные интервалы получаются достаточно большими, так как основная погрешность МКС-1117М с блоком детектирования БДКГ-05 составляет 20%, а для ТЛД – 15%. Но точечные значения образуют нисходящий тренд, о чем говорит достаточно большой коэффициент детерминации ($0,69$), что маловероятно при случайном наборе данных. Также маловероятно нахождение практически всех значений ниже первого значения; ожидается, что при отсутствии зависимости показания ТЛД с вычетом фона были бы равномерно распределены в пределах доверительного интервала для первого значения по обе стороны. Из этого делается вывод, что корреляция, представленная на рис.2, действительно присутствует и не является результатом погрешности приборов и измерений.

По результатам первого месяца можно сделать вывод, что только что отожженные дозиметрические детекторы не имеют нулевого значения, даже с учетом фоновых значений ИЭД $H_p(10)$ не равен нулю. Важно отметить, что согласно НРБ-99/2009 для женщин репродуктивного возраста необходимо контролировать эквивалентную дозу внешнего облучения на нижней части живота каждый месяц. Таким образом, если «свежеотожженные» дозиметрические детекторы репродуктивные женщины носят в течение месяца, то помимо доз, которые они получили при работе с техногенными источниками ионизирующего излучения, измеренный ИЭД включает «остаточные» дозы из-за того, что элемент ТЛД имеет «хвост», который при отсутствии набора дозы интерпретируется оборудованием как набранная доза.

Сразу после отжига дозиметрических слайдов 31.01.2024 произведен замер этих же детекторов. На рис.3 представлена кривая свечения одного из детекторов.

На рис.3 видно, что кривая свечения не имеет выраженного пика, но стоит отметить, что «свежеотожженный» дозиметр не должен иметь пика высвечивания. Результаты измерения $H_p(10)$ показывают, что индивидуальный эквивалент дозы гамма-излучения составляет $100,5$ мкЗв, но в теории после отжига результаты измерения должны быть равны 0 мкЗв. Далее проанализирована кривая свечения, замер которой проводился 01.03.2024 (в конце первого месяца) (рис.4).

На рис.4 видно, что в конце первого месяца начинает проявляться пик, интенсивность которого растет и составляет около $2,25$ нА. На кривой свечения наблюдается «хвост», который по интенсивности примерно в 2 раза меньше информативного пика. Выдвинуто предположение: «наброс доз» связан с тем, что «хвост» входит в светосумму из-за того, что форма Гаусса определяется некорректно.

Стоит отметить, что «наброс доз» для партии дозиметров, время экспонирования для которых составляет один месяц, неодинаков: в ходе эксперимента выявлено, что возможны «набросы» за месяц в диапазоне от 0,1 мЗв до 1 мЗв. Если бы величина «наброса» была одинакова и равномерна для всей партии, ее можно было бы отсечь за счет вычитания фоновой составляющей (результатов измерений фонового дозиметра из этой же партии). В связи с неравномерностью искусственного завышения в одной партии становится невозможно корректно отсечь «наброс» доз.

Выдвинута гипотеза, что «наброс доз» для одного дозиметра постоянный, тогда возможно найти величину «наброса доз» для каждого дозиметра и вычитать ее при последующих измерениях. Проведенные эксперименты дали отрицательный результат, то есть при каждом измерении одного и того же дозиметра величина «наброса доз» за месяц была различной. Таким образом, даже для одного дозиметра нельзя отсечь составляющую, связанную с «набросом доз».

На втором месяце экспонирования термoluminescentного дозиметра значения индивиду-

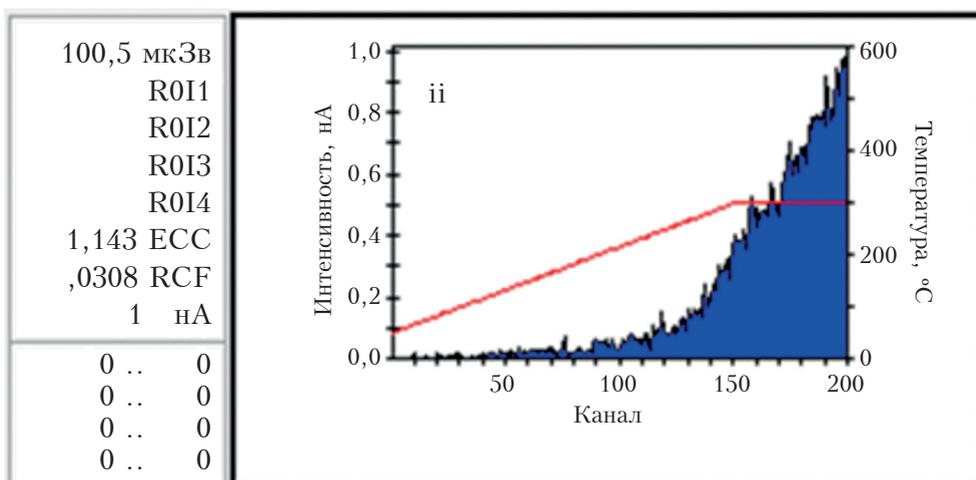


Рис.3. Кривая свечения слайда в первый день эксперимента.

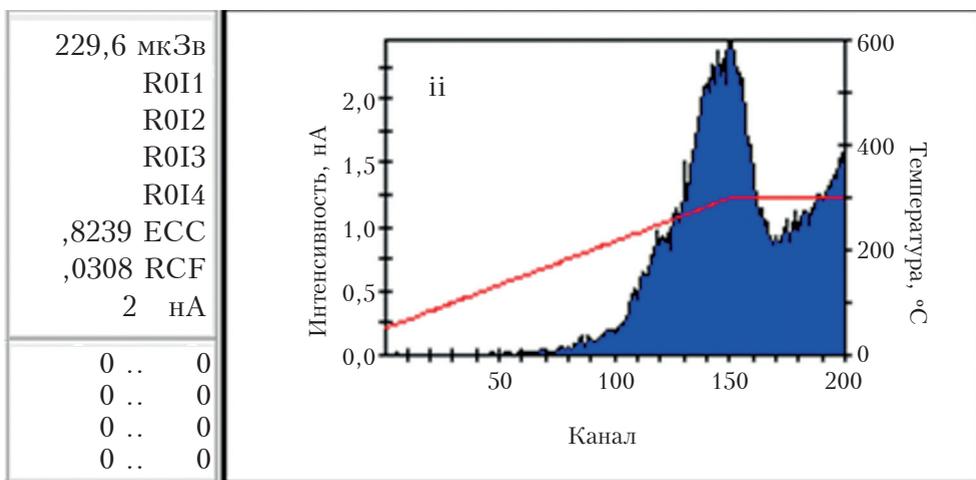


Рис.4. Кривая свечения слайда в конце первого месяца.

ального эквивалента дозы с вычетом фонового значения стали меньше примерно в два раза, но также отличны от нуля. По результатам третьего месяца измерений термолюминесцентных дозиметров наблюдаются нулевые значения индивидуального эквивалента дозы в 84, 96 и 98 день измерения за вычетом фона, после 90-го дня измерения значения индивидуального эквивалента дозы близятся к нулю с учетом фоновой составляющей.

На рис. 5 и 6 представлены замеры в конце второго и в конце третьего месяца.

С увеличением времени выдержки дозиметров возрастает площадь информативного

пика при практически неизменной величине «хвоста». Начиная с конца второго месяца увеличивается значение интенсивности пика, он становится более отчетливым, ровным, увеличивается соотношение пик-«хвост». Информативные пики после 2–3 месяцев выдержки хорошо описываются формой Гаусса.

В рамках эксперимента проверена гипотеза о возможном недостаточном отжиге индивидуальных дозиметров, который мог бы быть причиной завышенных значений индивидуальных доз. Проведены эксперименты по многократному отжигу детекторов, которые показали, что пятикратный отжиг одного детектора

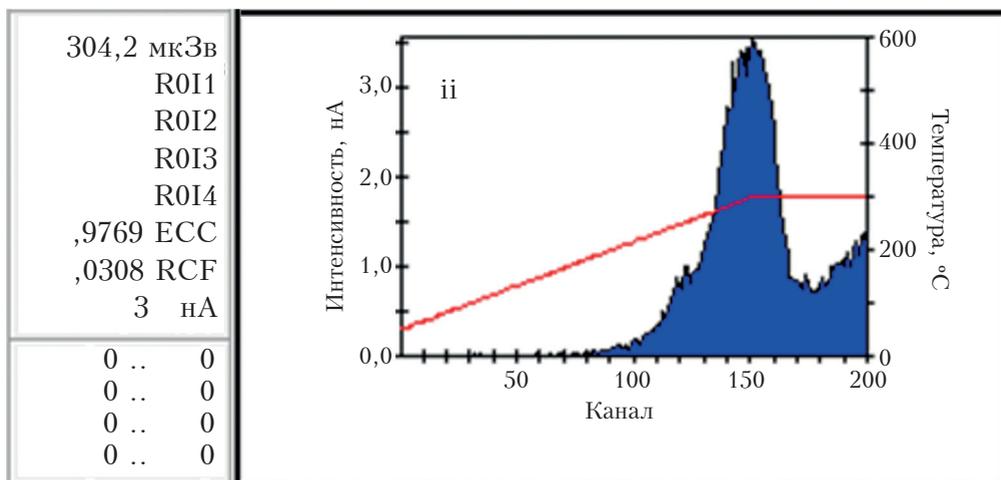


Рис.5. Кривая свечения слайдов в конце второго месяца.

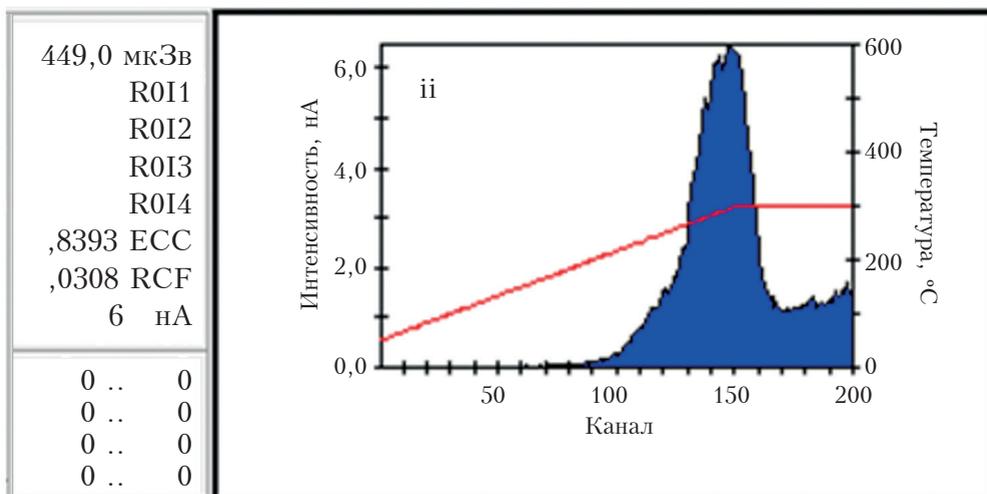


Рис.6. Кривая свечения слайда в конце третьего месяца.

приводит к незначительному уменьшению набранной дозы. На рис.7–11 представлены результаты пятикратного отжига одного детектора индивидуального дозиметра.

При анализе данных на рис. 7–11 можно сделать вывод, что пятикратный отжиг приводит к незначительному уменьшению «наброса» дозы: с 35 до 25 мкЗв. Таким образом, многократный отжиг не устраняет проблему полностью. Данный «наброс» дозы можно связать со считыванием информации не только из информационного пика, который отсутствует на рис. 7–11, а также из «хвоста» (крайние правые значения).

Стоит заметить, многократный отжиг создает дополнительную проблему, связанную с ресурсом использования индивидуальных дозиметров. Рекомендуемое количество отжигов – 500 раз, пятикратный отжиг сократит количество циклов использования в 5 раз.

Таким образом, наиболее оптимальным решением для получения результатов измерения индивидуального эквивалента дозы от гамма-излучения без «наброса» доз является длительное экспонирование дозиметров до их выдачи, что позволит уменьшить влияние случайных колебаний уровня фона на результаты измерений.

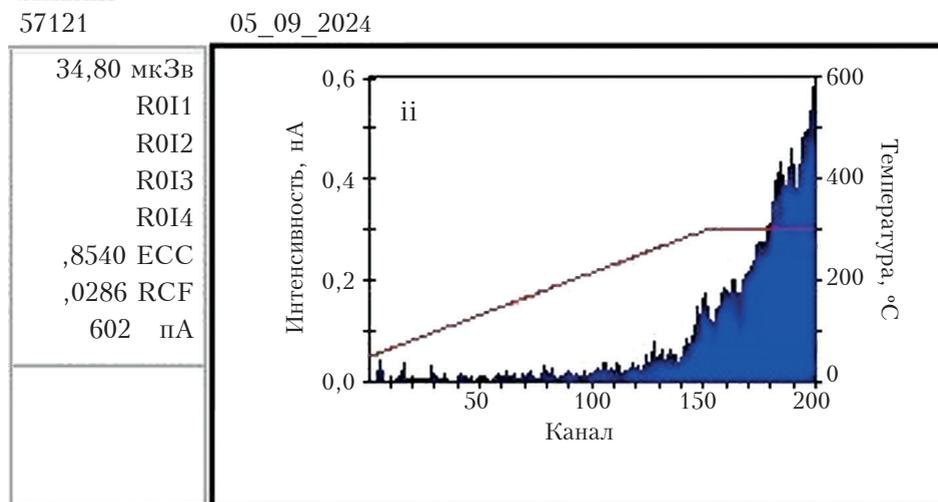


Рис.7. Первый отжиг индивидуального дозиметра.

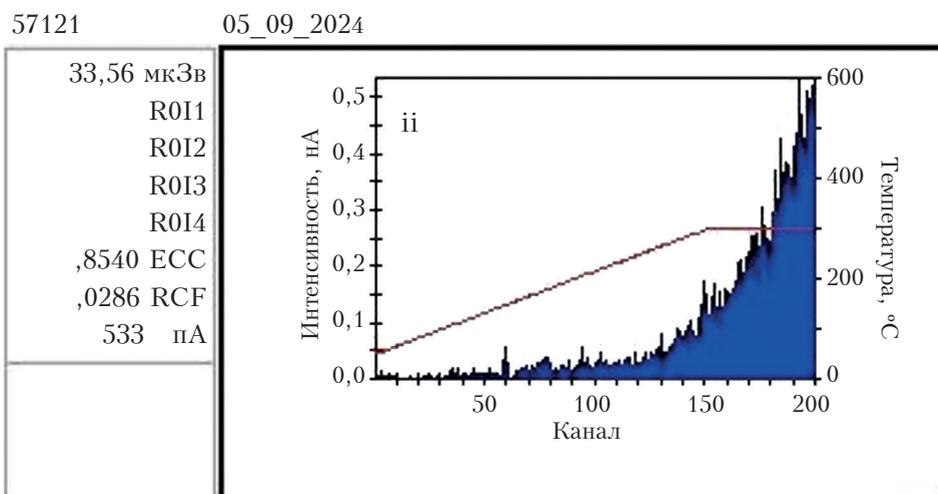


Рис.8. Второй отжиг индивидуального дозиметра.

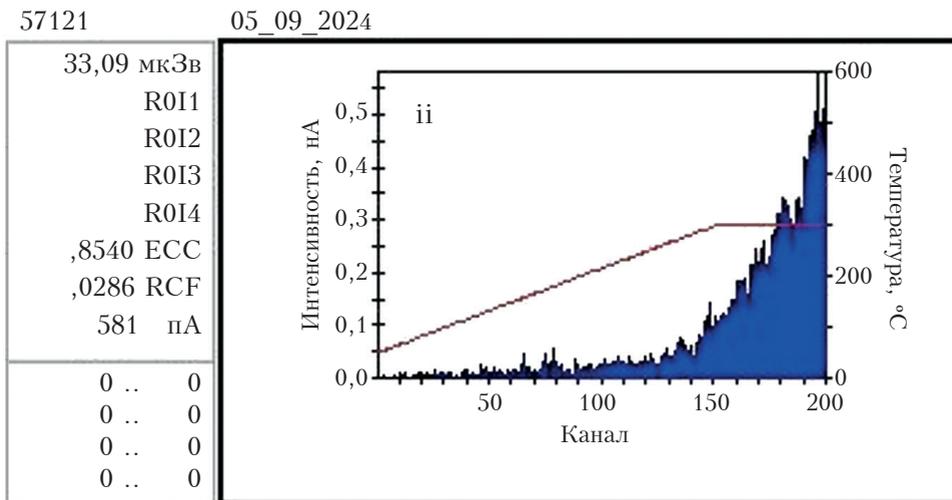


Рис.9. Третий отжиг индивидуального дозиметра.

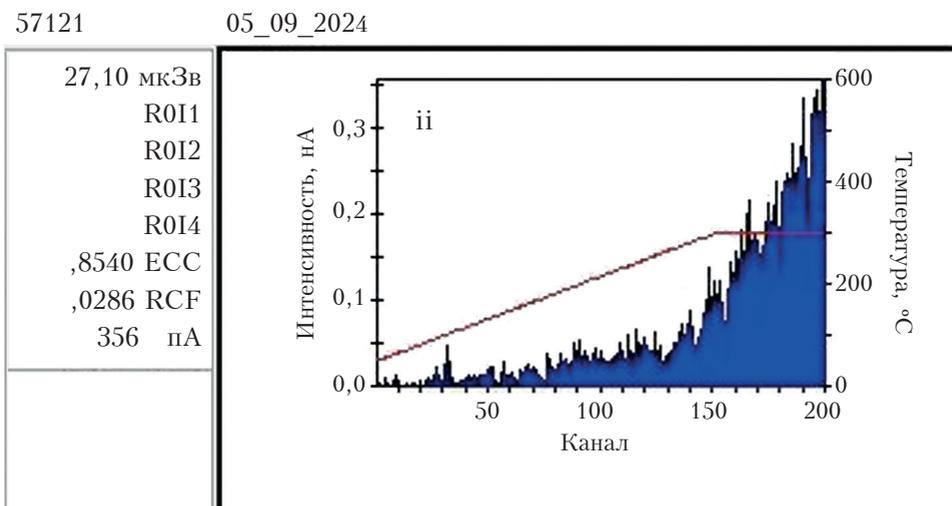


Рис.10. Четвертый отжиг индивидуального дозиметра.

Стоит отметить, что выдерживание дозиметров дольше трех месяцев нерационально, так как «наброс доз» близится к нулю и отмечается хорошая сходимость данных ТЛД-измерений с результатами измерений прямопоказывающих дозиметров.

Заключение

В ходе работы с автоматизированной термолюминесцентной дозиметрической системой Harshaw обнаружено, что результаты измерения ИЭД «свежеотожженного» дозиметра

не равны нулю. На основании этого проведен эксперимент по определению оптимального времени между отжигом и измерением термолюминесцентных дозиметров 0110 Harshaw.

С учетом вычитания фона опытным путем показано, что значения индивидуального эквивалента дозы $H_p(10)$ гамма-излучения снижается в течение трех месяцев. Чем дольше выдерживается дозиметр, тем отчетливее на кривой свечения выявляется пик интенсивности, увеличивается различие в соотношении пик-«хвост».

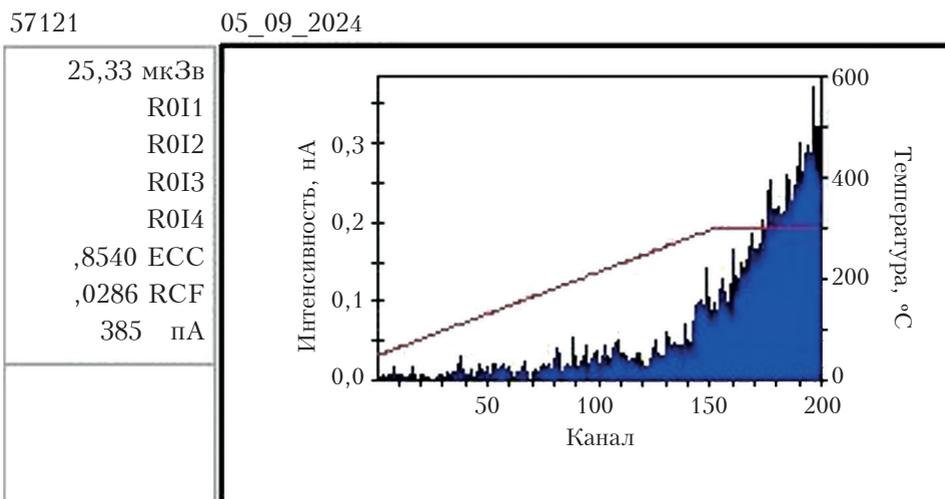


Рис.11. Пятый отжиг индивидуального дозиметра.

В качестве временного решения проблемы «наброса доз» при ежемесячном измерении эквивалентной дозы нижней части живота у репродуктивных женщин можно предложить выдерживать дозиметры два месяца и выдавать на третий. Выдача дозиметров на три месяца с последующим вычислением среднего значения индивидуальной эквивалентной дозы за один некорректно для контроля эквивалентной дозы на поверхности нижней части живота женщин репродуктивного возраста, так как не учитывает возможную неравномерность набора месячной дозы в течение трех месяцев. В один месяц женщина до 45 лет, например, может отбирать пробы и набрать 1,5 мЗв, а в последующие месяцы практически не работать с источниками ионизирующего излучения и набрать маленькое значение ИЭД. Рассчитывая среднее значение за три месяца, нет возможности отследить, какую дозу репродуктивная женщина набрала за каждый месяц и есть ли риск превышения основных пределов доз НРБ-99/2009.

Анализ кривых высвечивания показывает, что система обработки воспринимает неинформационный пик (крайние правые значения) как информационный пик. При увеличении пло-

щади информационного пика данный эффект уменьшается и становится незначительным. Таким образом, одним из решений может быть изменение областей обработки для корректного распознавания информационного пика.

Если предложенная процедура невозможна или не даст результатов, можно предложить провести дополнительные исследования. Провести исследования по контролируемому набору доз от источников ионизирующего излучения с целью выявления зависимости остаточного «наброса доз» от полученной дозы (сейчас 3 месяца фоновой выдержки, что приблизительно равно дозе 0,4 мЗв, хватает, чтобы исключить эффект «наброса доз»). Если будет выяснено, что контролируемое облучение нивелирует эффект наброса доз, то можно облучать дозиметры на точно определенное значение перед их выдачей, а при измерениях вычитать эту составляющую.

Если все вышеперечисленные меры не дадут результата, то необходимо придумать принципиально новый метод измерения эквивалентной дозы нижней части живота у репродуктивных женщин.

Метод многократного отжига дозиметров также не является решением проблемы, так как

экономически невыгоден. При таком способе снижения влияния «наброса» доз цикл использования детекторов сокращается в 5 раз.

В качестве временной меры предложенная выдержка на два месяца не должна привести к серьезным экономическим последствиям, так как обычно на предприятиях число женщин репродуктивного возраста (до 45 лет) группы А относительно мало, то есть количество необходимых дополнительных дозиметров также будет невелико. Таким образом, существенного удорожания процесса ведения индивидуального дозиметрического контроля не должно наблюдаться.

Важно отметить, что помимо времени выдержки дозиметра существует множество факторов, которые также могут внести вклад в значение индивидуального эквивалента дозы, например, если на детектор попали частички пыли, которые дадут вспышку света и будут восприняты считывателем, как световспышка от элемента детектора. Еще одним фактором может являться загрязнение

материала детектора секретом солевых желез, что аналогично пыли даст световспышку при нагревании детектора. Ограничение вклада влияния вышеперечисленных факторов осуществляется за счет использования корпуса детектора. При неаккуратном обращении с дозиметрическими детекторами, не поддержании условий измерения, установленных в технической документации (повышенная температура и влажность) на результаты измерения могут повлиять такие явления как: фотолюминесценция, триболюминесценция и хемилюминесценция. Кроме того, эквивалентные дозы на нижней части живота у женщин до 45 лет чаще всего находятся в пределах малых доз, которые могут быть ниже предела регистрации ТЛД в 100 мкЗв. Следует учесть, что если набранная доза меньше или близка к пределу регистрации, то результаты измерения могут оказаться некорректными, и при обработке появятся завышенные результаты ИЭД $H_p(10)$ гамма-излучения.

Литература

1. Нормы радиационной безопасности (СанПиН 2.6.1.2523-09). Официальное издание. Утверждены главным государственным санитарным врачом Российской Федерации от 07.07.2009. Введены в действие 1 сентября 2009. М., 84 с.
2. Москвина Н.А., Батухтина О.Н., Шевченко Е.В., Давыдовская А.М., Полева А.Ю. Применение термолюминесцентных детекторов для радиационно-гигиенического контроля // Медицинская физика. 2011. № 4(52). С. 64-69.
3. Кайдановский Г.Н., Пирогова Е.Н. Пути повышения точности и достоверности оценки индивидуальных доз персонала термолюминесцентным методом // Радиационная гигиена. 2012. Т. 5, № 2. С. 41-47.
4. K.J. Velbeck, L.Z. Luo and K.L. Streetz, «Type testing the model 6600 plus automatic tld reader», *Radiation Protection Dosimetry*, 2006, vol. 120, no. 1-4, pp. 303-306.
5. Ким Д.С., Нуртазин Е.Р. О некоторых термолюминесцентных системах индивидуальной дозиметрии внешнего радиоактивного облучения // Мир измерений. 2017. №4. С. 24-29.
6. Описание типа средств измерений. Системы термолюминесцентные дозиметрические автоматизированные Harshaw моделей 6600, 6600 lite. Приложение к свидетельству № 42135 об утверждении типа средств измерений – 10 с.
7. Дозиметрия. Определение индивидуальной эффективной дозы нейтронного излучения. Методические указания (МУ 2.6.5.052-2017). Официальное издание. Утверждены главным государственным санитарным врачом ФМБА Российской Федерации от 11.10.2017. Введены в действие с момента утверждения. М., 103 с.

Determination of the Optimal Time for the Use of Thermoluminescent Dosimeters when Conducting Individual Dosimetric Monitoring Using the Harshaw Thermoluminescent Dosimetric Automated System

Kovalenko Arina (branch of JSC Rosenergoatom Concern Leningrad Nuclear Power Plant, Sosnovy Bor, Russia)

Balachkov Maksim, Yurchenko Elena (National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk Polytechnic University, TPU, Tomsk, Russia)

Abstract. An experiment of measuring of the dose accumulation rate of 120 Harshaw slides type 0110 over three months was conducted. It was revealed that the results of measuring the accumulated dose after annealing the dosimeter are not equal to zero, but are about 0,1 mSv. Subsequent daily measurements of other dosimeters showed that the dose rate was about $0,00344 \pm 0,00025$ mSv/day, which does not correspond to the dosimeter-radiometer MKS-AT1117M readings of $0,0046 \pm 0,0009$ mSv/day. It has been suggested that it is necessary to take into account the identified effect when determining the individual dose equivalent of external irradiation to the lower abdomen for women of reproductive age or to use a fundamentally new method for determining this value.

Keywords: *thermoluminescent dosimeter, individual dosimetric control, individual dose equivalent.*

А.А.Коваленко¹ (инж.), М.М.Балачков² (зав.лаб.), Е.А.Юрченко² (инж.)

¹ Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ленинградская атомная станция», г. Сосновый бор Ленинградской обл.

² Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

Контакты: тел. +7 (923) 482-64-88; mtmb2@tpu.ru.