

УДК 539.12.08

**МЕТОДЫ ОПТИЧЕСКИ-СТИМУЛИРОВАННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ
ДОЗИМЕТРИИ**

Сарсенова С.М.

nuclei_dsm20@mail.ru

Докторант 1-го курса ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Нур-Султан, Казахстан

Научный руководитель – Жумадилов К.Ш

На сегодняшний день существует множество методов дозиметрии. Одним из них является оптически-стимулированная люминесцентная (ОСЛ) дозиметрия, которая относится к твердотельной. Само явление оптически стимулированной люминесценции описывается как люминесценция, зависящая от дозы и испускаемая ранее облученным ионизирующим излучением материалом под действием света [1]. Длина волны воздействующего света должна быть меньше длины волны самого испускаемого света.

Выход люминесценции пропорционален поглощенной дозе материала и зависит от интенсивности и длины волны стимулирующего света. Стимуляция света осуществляется двумя способами: режим непрерывной (незатухающей) волны и импульсный режим. В качестве накопителей доз используются природные и искусственные материалы: кварц, полевой шпат, кремний, керамика, термолюминесцентные (ТЛ) люминофоры, оксид алюминия ($Al_2O_3:C$), неделимые материалы (кирпичи, облицовочные плитки, глиняные изделия и др.) [2].

Впервые данный метод был предложен в 1950-х годах, позже в 1980-х годах широко применялся в археологическом и геологическом датировании. После аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году возросла необходимость в точной оценке накопленных доз ионизирующих излучений, поэтому ОСЛ дозиметрия наряду с другими методами начала совершенствоваться и активно применяться.

Поглощение энергии от источника ионизирующего излучения изоляционным или полупроводниковым материалом приводит к возбуждению свободных электронов и дырок, с последующим поглощением этих электронных частиц на дефектах (центрах захвата заряда) внутри материала. После снятия возбуждения образец может быть оптически стимулирован и поглощенная энергия приведет к высвобождению носителей заряда одного знака, которые затем рекомбинируются с носителями заряда противоположного знака. Поглощение излучения и возбуждение заряда приводят к возмущению системы от состояния термодинамического равновесия до метастабильного состояния. Последующее поглощение внешней энергии метастабильным захваченным зарядом приводит к стимулированной релаксации системы обратно к ее равновесному режиму. В процессе релаксации происходит рекомбинация электронного заряда и, если эта рекомбинация является излучающей, появляется люминесценция. В ОСЛ источником стимулирующей энергии является свет (ультрафиолетовый, видимый или инфракрасный). Интенсивность люминесценции контролируется в виде функции времени, что приводит к построению характеристической кривой зависимости люминесценции от времени. Таким образом, исходная интенсивность связана с количеством захваченного заряда, который, в свою очередь, пропорционален начальной дозе поглощенного излучения. Это является основой для использования ОСЛ в радиационной дозиметрии [3].

Эффективность ОСЛ дозиметрии зависит от используемого материала. Как было сказано выше, для оценки доз внешнего облучения используются различные материалы, от них и зависит сама методика измерений.

В работе исследовательской группы Государственного университета Оклахомы [4] представлены результаты исследований в области ОСЛ дозиметрии с использованием оксида алюминия, легированного углеродом ($Al_2O_3:C$). Основными достижениями являются:

- разработка оптико-волоконной системы в реальном времени для *in vivo* дозиметрии в лучевой терапии;
- разработка волоконной дозиметрической системы для дистанционного обнаружения радиологических загрязнителей в почве;
- характеристики оксида алюминия в области тяжелых заряженных частиц и исследование зависимости плотности ионизации ОСЛ от $Al_2O_3:C$;
- быстрая и самостоятельная оценка естественных доз бета- и гамма- компонентов в природных отложениях.

Рассмотрены перспективы применения наноразмерных порошков на основе нитрида алюминия (AlN) в качестве твердотельной среды для создания детекторов УФ-излучения [5]. В ходе исследований было обнаружено наличие длительной фосфоресценции после отключения возбуждающего сигнала, и ее необходимо учитывать при использовании нанопорошка для достоверной оценки поглощенной дозы методом ОСЛ в УФ-дозиметрии.

Были исследованы характеристики ОСЛ детекторов на основе высокочувствительного кристалла $\alpha-Al_2O_3$, выращенного методом вертикального

градиентного замораживания. Данный метод ранее использовался для выращивания кристаллов LiCaAlF_6 , CdZnTe и др. Кристалл можно применять в качестве люминесцентного материала в ОСЛ дозиметрии для измерения очень низких доз [6]. Также были изучены ТЛ и ОСЛ характеристики природного красного и синего корунда, содержащий оксид алюминия (Al_2O_3) [7].

Определение доз облучения населения после радиационной аварии или террористического акта – это одна из главных задач дозиметрической службы, которая требует постоянного совершенствования методов дозиметрии. В статье [8] представлены исследования по разработке метода ОСЛ дозиметрии с использованием резисторов мобильных телефонов, так как конструкция резистора содержит материал из керамики и резистор может быть легко извлечен из корпуса телефона. В настоящее время, практически каждый человек носит с собой мобильный телефон и где бы ни случилась радиационная авария или террористический акт, можно определить дозу облучения, воздействию которого, подвергся человек. Тем самым можно дать предварительную оценку того, кто получил максимальную или минимальную дозу в течении 144 часов после инцидента.

Проведены [9] сравнительные измерения доз внешнего облучения на основе ОСЛ в NaCl и ТЛ в LiF . Исследовалось радиоактивное загрязнение деревни Светиловичи (Беларусь) радионуклидом ^{137}Cs в результате чернобыльской аварии. В работе [10] исследованы люминесцентные свойства бытовой соли (NaCl), широко применяемой в Нигерии для ретроспективной дозиметрии в случае радиационных аварий. Результаты исследования показали, что в пределах погрешности образцы соли могут быть использованы в качестве дополнительных дозиметров в радиационных аварийных ситуациях.

Одним из методов, представляющих интерес, является ОСЛ дозиметрия по зубной эмали [11, 12]. Подробно исследованы ОСЛ свойства зубной эмали с целью разработки метода оценки доз *in vivo* после радиационной аварии или террористического акта. Несколько основных выводов в результате этого исследования: чувствительность зубов и их фрагментов значительно отличаются друг от друга; наблюдался быстрый спад ОСЛ сигнала в течение первых 12 часов; стимуляция голубым светом дает большую чувствительность, чем инфракрасная стимуляция. Измерение сразу после воздействия показало минимальное значение 27 мГр для самого чувствительного образца, а ограничение по времени составило 24 часа.

Рассмотрим примеры использования методов ОСЛ дозиметрии для объектов, где были произведены взрывы атомной бомбы (Хиросима и Нагасаки, Семипалатинский испытательный полигон) и произошли радиационные аварии (АЭС «Фукусима-1» и Чернобыльская АЭС).

Для определения накопленных доз при взрыве атомной бомбы в Хиросиме и Нагасаки в качестве образцов были использованы зерна кварца и полевого шпата [13, 14]. Проведены сравнительные расчеты доз бета- и гамма-излучений, а также измерены накопленные дозы внешнего облучения в районе радиационных осадков после аварии на АЭС «Фукусима-1». Кварцсодержащие образцы (кирпичи зданий) были отобраны в городах Одака и Минами-сома, в населенном пункте Иитате, прилегающих к АЭС [15, 16].

На территории Казахстана исследования методом ОСЛ дозиметрии [17, 18, 19] проводились для оценки накопленных доз внешнего облучения в результате ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне. Использовались кварцсодержащие кирпичи, извлеченные из зданий в населенных пунктах. После получения результатов по высоким дозам в селе Долонь продолжились исследования по оценке накопленных доз внешнего облучения.

Проведены исследования [20] по совершенствованию люминесцентных методов и ряда методологических разработок, пригодных для использования при реконструкции доз внешнего гамма-облучения после аварии на Чернобыльской АЭС. В качестве объектов были выбраны города Новозыбков и Жаровщина (Россия), так как они относятся к радиоактивно загрязненным городам. Здесь также были использованы кварцсодержащие образцы.

Можно сделать вывод, что на сегодняшний день метод ОСЛ дозиметрии несмотря на свои недостатки является высокочувствительным, широко применяемым в различных областях исследования, а также постоянно совершенствующимся методом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Lopes C.C. et al. Optically stimulated luminescence of $\text{CaF}_2: \text{Ce}$ //Journal of Luminescence. – 2018. – Т. 199. – С. 266-270.
2. Bøtter-Jensen L., McKeever S. W. S. Optically stimulated luminescence dosimetry using natural and synthetic materials //Radiation protection dosimetry. – 1996. – Т. 65. – №. 1-4. – С. 273-280.
3. Аксельрод М.С. Основы материалов, методик и измерительной аппаратуры для ОСЛ и FNTD дозиметрии.
4. McKeever S.W. S. et al. Recent advances in dosimetry using the optically stimulated luminescence of $\text{Al}_2\text{O}_3: \text{C}$ //Radiation protection dosimetry. – 2004. – Т. 109. – №. 4. – С. 269-276.
5. Вохминцев А.С. и др. Параметры оптически стимулированной люминесценции в нанопорошках на основе нитрида алюминия //Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. – 2011.
6. Sun T. et al. Optically stimulated luminescence of $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3: \text{C}$ by the vertical gradient freezing (VGF) method //Journal of Luminescence. – 2019. – Т. 205. – С. 568-571.
7. Kalita J.M., Thomas S., Chithambo M. L. Thermally and optically stimulated luminescence of natural red and blue corundum (Al_2O_3) //Journal of Luminescence. – 2019. – Т. 205. – С. 417-422.
8. Smith R.W. et al. Development of a retrospective/fortuitous accident dosimetry service based on OSL of mobile phones //Radiation protection dosimetry. – 2015. – Т. 164. – №. 1-2. – С. 89-92.
9. Bernhardsson C. et al. Comparative measurements of the external radiation exposure in a ^{137}Cs contaminated village in Belarus based on optically stimulated luminescence in NaCl and thermoluminescence in LiF //Health physics. – 2012. – Т. 103. – №. 6. – С. 740-749.
10. Ademola J.A. Luminescence properties of common salt (NaCl) available in Nigeria for use as accident dosimeter in radiological emergency situation //Journal of Radiation Research and Applied Sciences. – 2017. – Т. 10. – №. 2. – С. 117-121.
11. DeWitt R. et al. Optically stimulated luminescence (OSL) of tooth enamel and its potential use in post-radiation exposure triage //Health physics. – 2010. – Т. 98. – №. 2. – С. 432.
12. Sholom S. et al. Emergency dose estimation using optically stimulated luminescence from human tooth enamel //Radiation measurements. – 2011. – Т. 46. – №. 9. – С. 778-782.
13. Kerr G.D. et al. Workshop report on atomic bomb dosimetry—review of dose related factors for the evaluation of exposures to residual radiation at Hiroshima and Nagasaki //Health physics. – 2015. – Т. 109. – №. 6. – С. 582-600.
14. Hashimoto T. et al. Comparison of accumulated doses in quartz and feldspar extracts from atomic bomb-exposed roof tiles using several luminescence methods //Radiation measurements. – 2006. – Т. 41. – №. 7-8. – С. 1015-1019.
15. Endo S. et al. Comparison of calculated beta-and gamma-ray doses after the Fukushima accident with data from single-grain luminescence retrospective dosimetry of quartz inclusions in a brick sample //Journal of radiation research. – 2018. – Т. 59. – №. 3. – С. 286-290.
16. Степаненко В.Ф. и др. Опыт инструментальной оценки накопленных доз внешнего облучения с использованием метода ретроспективной люминесцентной дозиметрии по единичным микрокристаллам кварца из кварцсодержащих образцов, отобранных в префектуре Фукусима, Япония //Радиация и риск. - 2018. – Т. 27. - № 3. - С. 79-90.
17. Bailiff I. K. et al. The application of retrospective luminescence dosimetry in areas affected by fallout from the Semipalatinsk nuclear test site: an evaluation of potential //Health Physics. – 2004. – Т. 87. – №. 6. – С. 625-641.

18. Güksu Y.H. et al. Intercomparison of luminescence measurements of bricks from Dolon'village: Experimental methodology and results of European study group //Journal of radiation research. – 2006. – T. 47. – №. Suppl_A. – C. A29-A37.

19. Stepanenko V.F. et al. International Intercomparison of Retrospective Luminescence Dosimetry method: sampling and distribution of the brick samples from Dolon' village, Kazakhstan //Journal of radiation research. – 2006. – T. 47. – №. Suppl_A. – C. A15-A21.

20. Bailiff I.K. The development of retrospective luminescence dosimetry for dose reconstruction in areas downwind of Chernobyl //Radiation protection dosimetry. – 1999. – T. 84. – №. 1-4. – C. 411-419.