

УДК 539.1

О.Ч. Торуюнок<sup>1</sup>, О.В. Дяченко<sup>1</sup>, М.Є. Альохіна<sup>2</sup>, О.А. Безшийко<sup>2</sup>,  
Л.О. Голінка-Безшийко<sup>2</sup>, І.М. Каденко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Концерн «Сакура» вул. Бориспільська, 9, корпус 61, 02099, Київ

<sup>2</sup>Київський національний університет ім. Тараса Шевченка

вул. Володимирська, 64/13, 01601, Київ

e-mail: alehina-rita@ukr.net

## ТРИВИМІРНА ДОЗИМЕТРІЯ В ПРОМЕНЕВІЙ ТЕРАПІЇ

В роботі проведено критичний огляд стану систем тривимірної дозиметрії починаючи з найперших дозиметрів і закінчуючи сучасними системами. Увага приділяється таким типам дозиметрів як дозиметр Фріке, поліуретановий радіохромний дозиметр та дозиметри на основі полімерних гелів. Розглядаються і порівнюються їх переваги, недоліки, технологічні особливості, різні методи оцінки поглинутої дози.

**Ключові слова:** тривимірна дозиметрія, фантом, гелевий дозиметр, променева терапія.

### Вступ

За кілька минулих десятиліть дистанційна променева радіотерапія онкологічних хворих розвинулася в досить точний метод доставки лікувальних доз іонізуючого випромінювання до потрібної області людського тіла безпечним способом, що дозволило мінімізувати радіаційно-ініційовані побічні ефекти. Одним з основних завдань відносно планування і здійснення радіотерапії є збереження нормальної тканини, гарантуючи при цьому ефективну смерть клітин пухлини. Разом з тим, поява складних методів радіотерапії створила нові проблеми для радіаційної дозиметрії. Стереотаксична, конформна радіотерапія, радіотерапія з модульованою інтенсивністю, радіохірургія і брахітерапія представляють собою ті області, де просторова і кількісна точність стають вкрай важливими для успіху лікування. Ці складні схеми радіотерапії вимагають точності в "сірих областях" звичайних дозиметричних методів. Зокрема, складання карти дозового розподілу в областях з високим градієнтом (на краю пучка або близько блоку формування поля), або істинні тривимірні карти дози завжди представляли собою проблеми для звичайної дозиметрії.

### Тривимірна дозиметрія

Такі добре вивчені дозиметри як іоні-

заційні камери, термолюмінесцентні дозиметри та радіохромні плівки можуть розглядатися як одно- і двовимірні дозиметричні системи, які обмежено застосовні для просторового картографування реальних об'єктів. У зв'язку з цим, інтерес до розробки тривимірних дозиметрів іонізуючого випромінювання з'явився досить давно. Особлива увага завжди приділялася тим дозиметрам, які змінюють свої оптичні властивості пропорційно поглиненій дозі. Тривимірні гелеві дозиметри вивчалися декількома дослідницькими групами ще в 1950-ті роки [1-3]. Дослідження щодо однієї з серед перших систем, заснованої на методі отримання тривимірного зображення розподілу дози, заслуговують уваги, їх було опубліковано [4] на початку 1960 року. Це система складалася з твердої парафінової матриці разом з галогенованим вуглеводнем в якості вільнорадикального ініціатора і лейкоосновою барвника. Недоліки цього дозиметра полягали в тому, що парафінова основа була непрозора, а отже вимагалася, щоб дозиметр був розділений на частини і концентрація барвника в кожній секції вимірювалася спектрофотометрично. З часом радіохромне зображення розвивалося в парафіновій матриці.

Наступна серія нововведень сталася в Єльському університеті США і пов'язана з використанням магніто-резонансної томо-

графії (МРТ) для вимірювання радіолітичного окислення в гелевих дозиметрах Фріке [5]. Потім була розроблена рецептура желатин/акріламідного дозиметра [6, 7] (BANG® гель) і оптичний лазерний комп'ютеризований томографічний (КТ) сканер [8] СПРУТ™ (MGS Research Inc, Madison, CT). Публікація в 1993-1994 рр. цих робіт з полімерної гелевої дозиметрії групи Maryanski M.J. зі співавторами [6, 7] викликала величезний відгук в науковому середовищі. Якщо до початку 1990-х років. вся кількість статей з тривимірної дозиметрії навряд чи сягала десятка, то вже до кінця 1990-х років. кількість публікацій з даного предмету за нашими даними становила не один десяток на рік. Було розроблено досить велику кількість рецептур полімерних гелевих дозиметрів (наприклад, BANG (Maryanski та ін., 1994; Maryanski та ін., 1996), MAGIC (Fong та ін., 2001), MAGAT (De Deene та ін., 2002; Hurley і співавт., 2005) MAGAS (Venning співавт., 2005), PAGAT (Venning співавт., 2005), VIPAR (Pappas і співавт., 1999), VIPARd (Kozicki співавт., 2005), VIPARnd (Kozicki та ін., 2007; Pantelis та ін., 2008) та PABIG (Kozicki, Rosiak 2003; Pantelis та ін., 2005; Pappas та ін., 2005)).

Тим не менш, багато з зазначених полімерних дозиметрів мали суттєві обмеження і недоліки. Багато з них були подолані шляхом розробки принципово нової системи PRESAGE™ - оптично прозорого радіохромного тривимірного дозиметра на основі поліуретану [9, 10]. До рецептури твердого дозиметра PRESAGE™ входить вільнорадикальний ініціатор і лейкооснова барвника і він не вимагає контейнера для підтримки своєї форми (див. рис. 1). Поліуретанова матриця являє собою тканино-еквівалентний матеріал і запобігає дифузії зображення дозового розподілу. Має місце лінійність залежність доза-відгук, яка не залежить як від енергії фотонів, так і від потужності дози.

Очевидно, що досягнення тривимірної дозиметрії стали доступні трохи раніше, ніж виникла потреба в їх використанні. Коли ця потреба виникла, інтерес до цих методів значно збільшився. Крім того, до цього часу фахівці отримали таку методи-

ку, як МРТ, що дозволяє фіксувати зміни стану речовини в об'ємі. Хоча крім ЯМР для оцінки опромінених гелів були розроблені інші методи, наприклад, за допомогою оптичної комп'ютерної томографії, МРТ гелева дозиметрія стала існуючим стандартом для істинної тривимірної дозиметрії. Це має місце через те, що два з трьох вищезазначених методів, а саме, дозиметрія Фріке та радіаційно-ініційована полімеризація, можуть бути кількісно оцінені за допомогою вимірювання відповідно поздовжнього і поперечного часів релаксації ЯМР ( $T_1$  і  $T_2$ ). Цей факт разом з широко поширеним впровадженням систем МРТ в установи охорони здоров'я привели до того, що гелева дозиметрія, яка зчитується за допомогою даного методу сприймається в якості *de facto* стандарту тривимірної клінічної дозиметрії.

### Основні типи сучасної тривимірної дозиметрії

Таким чином, сучасні тривимірні дозиметри можуть бути розділені на три основні типи, а саме, полімерні гелі, Фріке і поліуретановий радіохромний дозиметр. Перші дві системи складаються з гідрогелевої матриці, яка зберігає 3D просторове дозове розподілення у дозиметрі.

У гелях Фріке відбувається окислення розчину Фріке (підкислений насичений киснем водний розчин іона заліза (II),  $Fe^{2+}$ ) під дією іонізуючого випромінювання [11]. Коли розчин опромінюється, відбувається розкладання води, що приводить до утворення гідроперекисних радикалів ( $HO_2$ ). Гідроперекисні радикали реагують з іонами заліза (II), приводячи до їх перетворення в іони заліза (III) [12]. Іони заліза (III) мають швидкість поздовжньої ядерної магнітної релаксації ( $R_1$ ) іншу, ніж у води. Тому, дозовий розподіл може бути отримано із зображень  $R_1$ , отриманих за допомогою МРТ.

Другий тип гелевого дозиметра – полімерні гелі, який складається з мономерів, розчинених у в'язкій матриці. При опроміненні має місце реакція полімеризації, приводячи до зшивання сомономерів, забезпечуючи випадкову тривимірну зшити полімерну мережу,

наприклад, сополімеризація акриламідів і N, N-метіленбісакриламідів в межах желатинової матриці на основі води [6, 7]. Ступінь радіаційно-ініційованої полімеризації залежить від дози, і отримана зшита полімерна сітка впливає на рухливість оточуючих молекул води, таким чином роблячи вплив на швидкість поперечної ядерної магнітної релаксації ( $R_2$ ). У зв'язку з цим, дозові карти полімерних гелів будуються із зображень МРТ ( $R_2$ ). Крім того, було також продемонстровано можливе застосування оптичної системи КТ в якості альтернативного у ставленні до МРТ методу отримання зображення для полімерних гелевих дозиметрів [13].

За першими двома типами три вимірних гелевих дозиметрів є численні публікації, механізми процесів добре вивчені і, щонайменше, наукова інформація досить вірогідно представлена. Крім того, є численні варіації зазначених типів дозиметрів. На відміну від цього, за третього типу дозиметра - поліуретановому радіохромному дозиметру - є відносно невелика кількість публікацій і зроблені вони в основному групою J. Adamovics і співр [9]. Це не дивно, оскільки перші повідомлення по даній системі з'явилися в 2004 році [9] і вона представляла безсумнівний комерційний інтерес [14]. Судячи з публікацій, система складається з поліуретанової матриці, що виготовляється у відповідності з прийнятим в технології поліуретанів двостадійним процесом, галогеновмісними органічними сполуками - "вільнорадикального ініціатора" і лейкооснови трифенілметанового барвника (як правило, малахітового зеленого). Лише в одній з останніх публікацій у 2012 р. зазначено, що галогеновмісні органічні сполуки являють собою галоформи – хлоро-

форм, бромформ або йодоформ [15]. Механізм радіолітичних процесів, що відбуваються в зазначеній системі, в публікаціях Adamovics [9] не розкритий. Тим не менш, на підставі даних, опублікованих в російськомовній літературі [16, 17], можна вважати, що в процесі радіолітичного окислення лейкооснови малахітового зеленого задіяний ланцюговий механізм за участю галоїдметанів і кисню повітря. Вибір поліуретанів в цьому випадку визначається тим, що цей клас полімерів є одним з найбільш газопроникних серед відомих класів полімерів. Таким чином, можна вважати, що поліуретановий радіохромний дозиметр - це принципово нова тривимірна дозиметрична система. На сьогоднішній день кількість публікацій з цієї системи становить близько 50.

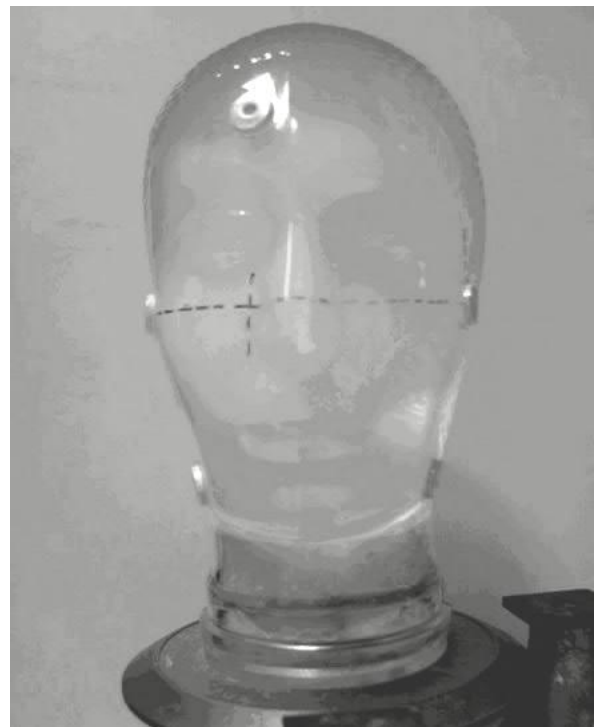


Рис. 1. Розподіл дози в поліуретановому радіохромному дозиметрі.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Day M.J., Stein G. Chemical dosimetry of ionizing radiations // *Nucleonics*. – 1951. – № 8. – P. 34.
2. Lefort M.J. Action of ionizing radiations on water and aqueous solutions // *Chem. Phys.* - 1950. – № 47. – P. 776.
3. Andrews H.L., Murphy R.E., LeBrun E.J. Gel dosimeter for depth dose measurements // *Rev. Sci. Instr.* - 1957. – № 28. – P. 329.
4. Potsaid M.S. and Irie G. Paraffin base halogenated hydrocarbon chemical dosimeters // *Radiology*. - 1961. – № 77. – P. 61–65.
5. Gore J.C., Kang Y.S., Schulz R.J. Measurement of radiation dose

- distribution by nuclear magnetic (NMR) imaging // *Phys. Med. Biol.* - 1984. – № 10. – P. 1189–1197.
6. Maryanski M.J., Gore J.C., Kennan R.P., Schulz R.J. NMR Relaxation Enhancement in Gels Polymerized and Cross-Linked by Ionizing Radiation: A New Approach to 3d Dosimetry by MRI // *Magnetic Resonance Imaging.* – 1993. - Vol. 11, No. 2. - P. 253-258.
  7. Maryanski M.J., Schulz R.J., Ibbott G.S., Gatenby J.X., Horton R. and Gore J.C. Magnetic resonance imaging of radiation dose distributions using a polymer gel dosimeter // *Phys. Med. Biol.* - 1994. – № 39. – P. 1437–1455.
  8. Xu Y., Wu C.S., Maryanski M.J. Performance of a commercial optical CT scanner and polymer gel dosimeters for 3D dose verification // *Med. Phys.* - 2004. – № 31. – P. 3024–3033.
  9. Adamovics J., Maryanski M.J. A New approach to radiochromic three-dimensional dosimetry-polyurethane // *J. Phys. Conf. Ser.* 3. - 2004. – P. 172–175.
  10. Adamovics J., Maryanski M.J. Characterisation of Presage™: A New 3-D Radiochromic Solid Polymer Dosemeter for Ionising Radiation // *Radiation Protection Dosimetry.* – 2006. - Vol. 120, No. 1–4. - P. 107–112.
  11. Schreiner L.J. Review of Fricke gel dosimeters // *Journal of Physics: Conference Series* 3. - 2004. – P. 9–21.
  12. Пикаев А.М. Современная радиационная химия. - М.: Наука, 1985. - Т. 1.
  13. Gore J.C., Ranade M., Maryanski M.J., Schulz R.J. Radiation dose distributions in three dimensions from tomographic optical density scanning of polymer gels: I. Development of an optical scanner // *Phys. Med. Biol.* - 1996. – № 41. – P. 2695–2704.
  14. U.S. Pat. Appl. Publ. (2007), US 20070020793 A1. Three-dimensional shaped solid dosimeter and method of use. By Adamovics, John A.
  15. Alqathami M., Blencowe A., Qiao G., Butler D., Geso M. Optimization of the sensitivity and stability of the PRESAGE dosimeter using trihalomethane radical initiators // *Radiation Physics and Chemistry.* – 2012. – Vol. 81, Issue 7, P. 867–873.
  16. Туронок О.Ч., Плачинда Я.В. Радиационно-химическая деструкция бутадиена-1,3 в различных растворителях // *Украинский химический журнал.* – 1993. - т. 59, № 6. – С. 665-668.
  17. Романцев М.Ф., Ларин В.А. Радиационное окисление органических веществ. - М.: Атомиздат, 1972. – 158 с.

Стаття надійшла до редакції 20.04.2013

O.Ch. Torunok<sup>1</sup>, O.V. Dyachenko<sup>1</sup>, M.Ye. Alokhina<sup>2</sup>, O.A. Bezshyyko<sup>2</sup>,  
L.O. Golinka-Bezshyyko<sup>2</sup>, I.M. Kadenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Concern “Sakura”, Boryspilska Str., 9, build. 61, 02099, Kyiv

<sup>2</sup>Taras Shevchenko National University of Kyiv  
Vladymyrska Str., 64/13, 01601, Kyiv

## THREE-DIMENSIONAL DOSIMETRY IN RADIOTHERAPY

There is shown a critical review of the current state of the three-dimensional dosimetry beginning from the very first and up to the last currently developed systems. The attention is paid to such types of dosimeters as the Fricke dosimeter, the polymer dosimeter and the radiochromic three-dimensional solid-state dosimeter. Their preferences, disadvantages, technological features, different methods of valuing the absorbed dose rate are considered and compared with each other.

**Keywords:** three-dimensional dosimetry, phantom, gel dosimeter, radiation therapy.

О.С. Торунук<sup>1</sup>, Е.В. Дяченко<sup>1</sup>, М.Е. Алёхина<sup>2</sup>, О.А. Бесшейко<sup>2</sup>,  
Л.А. Голинка-Бесшейко<sup>2</sup>, И.Н. Каденко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Концерн «Сакура» ул. Бориспольская, 9, корпус 61, 02099, Киев

<sup>2</sup>Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко  
ул. Владимирская, 64/13, 01601, Киев

## ТРЕХМЕРНАЯ ДОЗИМЕТРИЯ В ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

В работе проведен критический обзор состояния систем трехмерной дозиметрии, начиная с самых первых и заканчивая современными системами. Внимание предоставляется таким типам дозиметров как дозиметр Фрикке, полиуретановый радиохромный дозиметр и дозиметры на основе полимерных гелей. Рассматриваются и сравниваются их преимущества, недостатки, технологические особенности, разные методы оценки поглощенной дозы.

**Ключевые слова:** трехмерная дозиметрия, фантом, гелевый дозиметр, лучевая терапия.