

ИССЛЕДОВАНИЕ УВЕЛИЧЕНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В СРЕДЕ ЗА СЧЕТ ПРИСУТСТВИЯ ТЯЖЕЛОГО ЭЛЕМЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДОЗИМЕТРА ФРИКЕ

А.А. Черепанов¹, А.А. Липенгольц^{1,2,3}, Е.С. Воробьева^{2,3}, В.Н. Кулаков²,
В.А. Климанов³, Е.Ю. Григорьева¹

¹ Российский онкологический научный центр им. Н.Н. Блохина Минздрава РФ,
Москва

² Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна
ФМБА России, Москва

³ Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва

Увеличение поглощенной дозы рентгеновского излучения в тканях пациента, содержащих йод (за счет повышения фотоэффекта на атомах йода) играет важную роль как при рентгенодиагностике с контрастированием, так и при терапии злокачественных опухолей при помощи метода фотонно-захватной терапии. Проведено исследование локального увеличения энерговыделения в водном растворе йопромида с концентрациями йода от 2,5 до 50 мг/мл, при облучении рентгеновским излучением 100 и 200 кВ. Определение поглощенной дозы осуществлялось при помощи дозиметра Фрике. Обнаружено увеличение поглощенной дозы от 10 % до 450 % в диапазоне исследованных концентраций йода.

Ключевые слова: йод, рентгеновское излучение, фотонно-захватная терапия, дозиметр Фрике

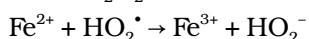
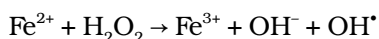
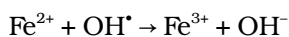
Введение

Разработка новой таргетной технологии лучевой терапии злокачественных новообразований – дистанционной фотонно-захватной лучевой терапии [1], основанной на увеличении поглощенной дозы в облучаемой мишени за счет присутствия в ней элемента с высоким зарядовым числом $Z \geq 53$, а также возникновение побочных явлений при рентгенологических исследованиях с контрастированием, а именно повреждения клеток крови [2] и радиационные ожоги при экстравазации контрастных препаратов из места инъекции [3], обуславливают необходимость количественного экспериментального определения локального увеличения поглощенной дозы в среде, содержащей различные концентрации тяжелого элемента.

Локальное увеличение энерговыделения в среде, содержащей тяжелый элемент, связано с его взаимодействием с рентгеновским излучением в диапазоне энергий от 30 до 300 кэВ по механизму фотоэффекта, с последующим испусканием фотоэлектронов и реализации каскада электронов Оже [4, 5]. Вторичное излучение фотоэлектронов и электронов Оже, образующихся в результате фотоэффекта, обладает низкой энергией и поэтому имеет небольшую длину пробега, что серьезно осложняет их регистрацию с использованием традиционных дозиметрических методов. По этой причине в данной работе был использован химический метод дозиметрии, а именно химический дозиметр, предложенный Фрике и Морсом. Суть данного эксперимента базируется на возможности непосредственного вне-

сения в состав дозиметра элемента с высоким Z , что позволяет оценить степень ионизации воды, обусловленной возникновением вторичного излучения, несмотря на короткие длины пробегов частиц.

Принцип регистрации поглощенной дозы дозиметром Фрике основан на реакции окисления ионов Fe^{2+} до трехвалентного состояния – Fe^{3+} в водном растворе под действием ионизирующего излучения [6]. Данный процесс происходит преимущественно за счет окисления ионов Fe^{2+} продуктами радиолиза воды, образующимися в воде при воздействии на молекулы воды ионизирующего излучения. Основные превращения Fe^{2+} , происходящие при этом, представлены ниже:



Число ионов Fe^{3+} , образовавшихся в результате реализации окисления ионов Fe^{2+} при облучении, и является мерилем поглощенной энергии, что надежно регистрируется химическим дозиметром.

Материал и методы

Облучения дозиметров проводились на рентгеновских установках УФИ и РУСТ-М (Диагностика-М, Москва) с номинальными анодными напряжениями на трубках 110 и 200 кВ соответственно. Мощность дозы в позиции облучения составляла 0,5 Гр/мин. Контроль величины мощности поглощенной дозы в позиции облучения осуществлялся ионизационной камерой ТМ30013 (PTW, Германия) в паре с блоком электрометра ДКС-АТ5350 (Атомтех, Белоруссии). Облучение дозиметров Фрике проводилось в пластиковых кюветах, объем облучаемого химического раствора (дозиметра) составлял 2,5 мл. Приготовление дозиметров Фрике осуществлялось по методике, описанной в работе [6]. В качестве тяжелого элемента использовался йод ($Z=53$) в составе иопронида в форме контрастного препарата Ультравист-370® (Bayer, Германия). Данный препарат добавляли к водному раствору дозиметра Фрике для достижения необходимых концентраций йода. Для исследования были выбраны следующие концентрации йода: 50, 25, 10, 5, 2,5 мг/мл.

Так как иопронид обладает высокой степенью оптического поглощения в области от 200 до 400 нм и перекрывает область поглощения трехвалентного железа, то в качестве количественного индикатора ионов Fe^{3+} был использован раствор тиоцианата аммония (NH_4SCN) (Panreac, Испания) с концентрацией 0,1 г/мл, который добавлялся в раствор после процедуры облучения в объеме 0,1 мл. Образующийся роданид Fe^{3+} имеет максимум поглощения в световой области спектра $\lambda_{max}=460$ нм [7]. Величину оптической плотности раствора при $\lambda=460$ нм определяли с помощью спектрофотометра Cary 50 (Varian Australia Pty Ltd, Австралия) относительно базовой линии поглощения дистиллированной воды.

Фактор повышения дозы (ФПД) определялся как отношение доз, полученных по данным спектрофотометрии растворов дозиметра Фрике, содержащего йод и исходного раствора без йода: $ФПД = D_i/D$, где D_i – значение поглощенной дозы по данным спектрофотометрии раствора дозиметра Фрике, содержащего йод, D – то же для исходного раствора Фрике без йода.

Результаты

В результате проведенных измерений была построена функция отклика дозиметра Фрике в диапазоне доз от 2,5 до 20 Гр. График функции отклика, который хорошо аппроксимируется линейной зависимостью, представлен на рис. 1. Данная функция определялась для каж-

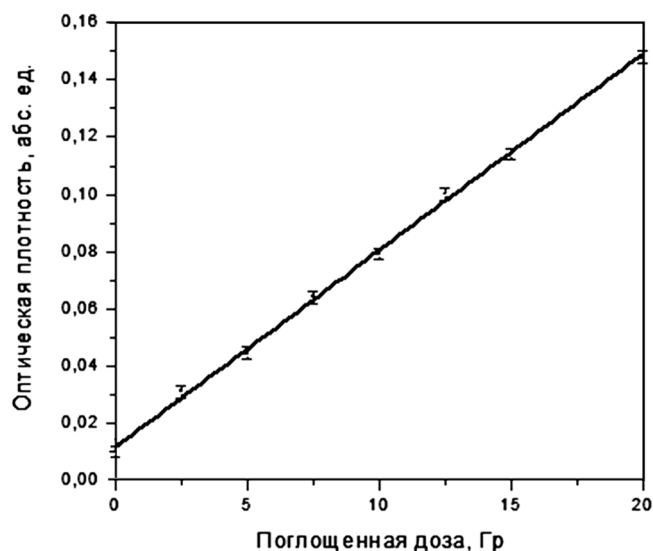


Рис. 1. Функция отклика дозиметра Фрике

Таблица 1
Значения фактора повышения дозы
для различных концентраций йода
и различных энергий
рентгеновского излучения

Концентрация I, мг/мл	ФПД (110 кВ)	ФПД (200 кВ)
2,5	1,2±0,1	1,1±0,1
5	1,3±0,1	1,2±0,1
10	1,7±0,2	1,5±0,2
25	3,1±0,3	2,5±0,2
50	4,8±0,5	4,5±0,4

дой серии экспериментов и была использована в качестве градуировочной для расчета поглощенных доз.

Предварительно было проведено исследование влияния иопромидов на химическую устойчивость системы дозиметра Фрике и радиационно-химический выход ионов трехвалентного железа. Для этого были приготовлены различные смеси дозиметра Фрике с иопромидом, тиоцианатом аммония, а также растворы серной кислоты с иопромидом, эквивалентные дозиметру Фрике. Данные смеси были облучены и были измерены значения оптической плотности на длине волны 460 нм. Показано, что присутствие иопромидов в системе не нарушает ее химической стабильности, а также не влияет на выход трехвалентного железа.

Смеси дозиметра Фрике и растворов иопромидов облучались в дозах от 2,5 до 10 Гр. Одна серия облучения включала 3 образца дозиметров. Средние значения ФПД для различных концентраций йода и различных энергий рентгеновского излучения представлены в табл. 1.

Обсуждение

В данной работе была показана возможность применения химического дозиметра для регистрации вклада в поглощенную дозу короткопробежных частиц, в том числе фотоэлектронов и электронов Оже. Главной особенностью и преимуществом данного метода является то, что детектирующий элемент, а именно ион Fe^{2+} находится в непосредственной близости от места возникновения короткопробежных частиц и может перейти в трехвалентное состояние под влиянием ионизации среды, вызванной короткопробежным излучением. Это позволяет количественно оценивать локальное увеличе-

ние поглощенной дозы в среде за счет присутствия тяжелых элементов. Предложенный метод измерения поглощенной дозы в присутствии тяжелых элементов может быть использован не только для йода, но и других элементов (золота, гадолиния и др.). При использовании данного метода необходимо контролировать устойчивость химической системы дозиметра. При внесении дополнительных компонентов в систему дозиметра нужно учитывать возможность их влияния на радиационно-химический выход ионов Fe^{3+} .

Полученные результаты наглядно демонстрируют увеличение поглощенной дозы в среде, содержащей тяжелый элемент, и показывают его количественное значение. Для концентраций йода от 2,5 до 50 мг/мл была установлена достоверно детектируемая разница в количестве образовавшихся ионов Fe^{3+} , что указывает на дополнительную ионизацию среды. Полученные значения ФПД также показывают, что увеличение дозы пропорционально концентрации тяжелого элемента.

Также была показана разница в значениях ФПД для двух энергий рентгеновского излучения. Для 110 кВ значение ФПД выше в диапазоне концентраций йода от 2,5 до 50 мг/мл, чем для 200 кВ. Данное различие объясняется тем, что при увеличении энергии фотонов внешнего излучения вероятность взаимодействия по механизму фотоэффекта с атомами йода уменьшается и, как следствие, уменьшаются образование вторичного излучения и величина ФПД.

Данные результаты позволяют более точно оценивать вклад в поглощенную дозу вторичного излучения в технологии фотонно-захватной терапии при планировании радиобиологических и клинических экспериментов, а также при рентгенологических исследованиях с контрастированием.

Список литературы

1. Хохлов В.Ф., Кулаков В.Н., Шейно И.Н. и соавт. Способ фотон-захватной терапии опухолей, Патент РФ № 2270045, Бюл. № 5 20.02.2004.
2. Grudzenski S., Kuefner M.A., Heckmann M.B. et al, Contrast medium-enhanced radiation damage caused by CT examinations // Radiology. 2009. Vol. 253. № 3. P. 706-714.

3. Spigos D.G., Thane T.T., Capek V. Skin necrosis following extravasation during peripheral phlebography // *Radiology*. 1977. Vol. 123. № 3. P. 605–606.
4. Auger P. Sur les rayons β secondaires produits dans un gaz par des rayons X, // *C.R.A.S.* 1923. Vol. 177, P. 169–171.
5. Парилис Э.С., Эффект Оже. – Фан Ташкент 1969. 211 с.
6. Olszanski A., Klassen N.V., Ross C.K. The IRS Fricke Dosimetry System. – Ottawa. 2002.
7. Peintler G., Nagy A., Horva A. K. et al. // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2002. Vol. 2, P. 2575–2586.

**EXPERIMENTAL STUDY OF X-RAYS ABSORBED DOSE INCREASE
IN MEDIUM CONTAINING HIGH-Z ELEMENT USING FRICKE DOSIMETER**

A.A. Cherepanov¹, A.A. Lipengolts^{1,2,3}, E.S. Vorobyeva³, V.N. Kulakov², V.A. Klimanov³, E Yu. Grigorieva¹

¹ N. N. Blokhin Russian Cancer Research Centre, Moscow

² A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Centre, Moscow

³ National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow

X-rays absorbed dose increase in patient tissues containing iodine and caused by x-rays photoabsorption on iodine atoms is a phenomenon to consider in radiodiagnostics with contrast enhancement as well as in contrast enhanced radiotherapy (CERT). Quantitative data on absorbed dose created by interaction of x-rays with iodine atoms is necessary for evaluation of radiodiagnostics studies safety and CERT antitumor efficacy. In this work experimental study of x-rays absorbed dose increase in iopromide water solution, containing from 2.5 to 50 mg per ml of iodine, was performed. Dose measurements was performed by use of liquid chemical Fricke dosimeter based on salt of ferrous bivalent iron. Increase of absorbed dose was observed from 10 % to 450 % in the range of studied iodine concentrations.

Key words: *iodine, photoabsorption, X-rays, binary radiotherapy, CERT, dose increase, dosimetry, Fricke dosimeter*

E-mail: Alexey.A.Cherepanov@gmail.com