DOI: 10.21870/0131-3878-2017-26-1-44-59

Локальные поглощённые дозы облучения медицинского персонала при брахитерапии рака предстательной железы микроисточниками ^{125}I российского производства

Степаненко В.Ф., Бирюков В.А., Карякин О.Б., Каприн А.Д., Галкин В.Н., Иванов С.А., Мардынский Ю.С., Колыженков Т.В., Петухов А.Д., Богачева В.В., Ахмедова У.А., Яськова Е.К., Лепилина О.Г., Санин Д.Б., Скворцов В.Г., Иванников А.И., Хайлов А.М., Анохин Ю.Н.

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

Эффективным и малоинвазивным методом терапии рака предстательной железы является внутритканевая лучевая терапия (брахитерапия), суть которой заключается в имплантации закрытых микроисточников ^{125}I в ткань опухоли. В связи с разработкой микроисточников ^{125}I российского производства, выпускаемых АО «ГНЦ РФ – «Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского» (Обнинск), и проведением клинических испытаний этих источников в Медицинском радиологическом научном центре (МРНЦ) им. А.Ф. Цыба (Обнинск), необходимо получение данных о локальных поглощённых дозах облучения медицинского персонала – кожи пальцев рук и глаз онколога-радиолога и медицинского физика, осуществляющих необходимые процедуры на этапах подготовки и проведения операции. От результатов такой дозиметрии зависит возможность широкого применения российских микроисточников ^{125}I в радиологических клиниках. Из-за малой энергии фотонного излучения, а также особенностей проведения подготовительных процедур и самой операции, пальцы рук и глаза медицинского персонала могут быть наиболее облучаемыми при брахитерапии рака предстательной железы источниками ^{125}I . Радионуклид ^{125}I распадается путём электронного захвата с периодом полураспада 60,2 сут, излучает характеристическое фотонное излучение (средняя энергия 28,33 кэВ, слой половинного ослабления в мягких тканях – около 2 см), электроны внутренней конверсии и Ожэ-электроны (эти электроны полностью поглощаются в материале герметичной капсулы источника). При измерениях поглощённых доз от облучения низкоэнергетическими квантами основной проблемой является доказательность результатов измерений, поскольку дозиметры должны быть достаточно чувствительными в диапазоне малых энергий, а энергетическая зависимость их отклика должна быть известна. В качестве автономных накапливающих термолюминесцентных (ТЛ) дозиметров квантового излучения малой энергии (от 10 до 100 кэВ) были использованы миниатюрные (5×1 мм) кристаллы оксида алюминия ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$), с применением отработанной в МРНЦ им. А.Ф. Цыба методики их применения, измерений и калибровки. Измерения этих дозиметров проводили в режиме термической стимуляции люминесценции, испускаемой монокристаллами оксида алюминия. Интенсивность пика термостимулированной люминесценции (соответствующего температуре нагрева 190 °С) пропорциональна дозе облучения кристаллов. Для измерений применили систему считывания термостимулированной люминесценции «Harshaw 3500». Дозиметры помещали в светонепроницаемые оболочки. В каждой светонепроницаемой оболочке в условиях электронного равновесия, в виде сборки размещали по три дозиметра. В соответствии с условиями НРБ-99/2009 площадь сборки дозиметров равна 2,7 см², толщина слоя оболочки в сборках составляет 40 мг/см² (для кожи рук) и 300 мг/см² для глаз. Дозиметры были размещены на всех пальцах обеих рук медицинского персонала, а также вблизи глаз онколога-радиолога. Сборки ТЛ-дозиметров закрепляли так, чтобы не создавать помехи работе персонала. При средней энергии квантов ^{125}I 28,33 кэВ используемые дозиметры дают завышенные показания (относительная величина фактора завышения равна $2,84 \pm 0,04$ по отношению к показаниям дозиметров при облучении гамма-квантами высокой энергии). Поэтому измеренные величины доз были уменьшены на величину этого фактора. Установлено, что в стандартных условиях проведения брахитерапии рака предстательной железы локальные поглощённые дозы у онколога-радиолога составляют $0,18 \pm 0,019$ мГр (указательный палец левой руки – наибольший уровень облучения) и $0,053 \pm 0,0057$ мГр (мизинец правой руки – наи-

Степаненко В.Ф.* – зав. лаб., д.б.н., проф.; Бирюков В.А. – с.н.с., к.м.н.; Карякин О.Б. – зав. отд., д.м.н., проф.; Каприн А.Д. – ген. директор, акад. РАН, д.м.н., проф.; Галкин В.Н. – директор, д.м.н., проф.; Иванов С.А. – зам. директора по научн. и лечебн. работе, д.м.н.; Мардынский Ю.С. – зав. отд., член-корр. РАН, д.м.н., проф.; Колыженков Т.В. – с.н.с., к.б.н.; Петухов А.Д. – м.н.с.; Богачева В.В. – инженер; Ахмедова У.А. – инженер; Яськова Е.К. – в.н.с., к.б.н.; Лепилина О.Г. – мед. физик; Санин Д.Б. – мед. физик, к.б.н.; Скворцов В.Г. – зав. лаб., к.б.н.; Иванников А.И. – в.н.с., к.ф.-м.н.; Хайлов А.М. – с.н.с., к.б.н.; Анохин Ю.Н. – с.н.с., к.м.н. МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России.

*Контакты: 249036, Калужская обл., Обнинск, ул. Королёва, 4. Тел.: (484) 399-70-02; e-mail: mrrc@mrrc.obninsk.ru.

меньший уровень облучения). Поглощённые дозы, соответствующие правому и левому глазу, равны $0,11 \pm 0,012$ мГр и $0,035 \pm 0,0039$ мГр соответственно. Локальные дозы облучения медицинского физика, принимавшего участие в предоперационной подготовке источников («нарезке» микроисточников), равны $0,16 \pm 0,034$ мГр (указательный палец левой руки – наибольший уровень облучения) и $0,013 \pm 0,0012$ мГр (безымянный палец правой руки – наименьший уровень облучения). Фоновая доза была учтена при анализе результатов измерений локальных доз облучения персонала микроисточниками ^{125}I . Указанные различия между правыми и левыми сторонами обусловлены особенностями положения источников по отношению к медицинскому персоналу: при работе радиоактивные источники поддерживаются пальцами левой руки, в то время как пальцами правой руки осуществляется направляющие движения инструментом. При этом источники находятся с правой стороны по отношению к голове онколога-радиолога. Из полученных данных следует, что даже максимальные величины измеренных локальных поглощённых доз не представляют радиационной опасности при использовании для радиотерапии российских микроисточников ^{125}I , т.к. согласно НРБ-99/2009 пределы дозы для населения составляют 50 мЗв в год в кистях, стопах и коже и 15 мЗв в год для глаз. Для персонала (группы Б и А) эти пределы еще выше: в 2,5 и 10 раз соответственно. Измерения локальных доз облучения персонала при брахитерапии импортными микроисточниками ^{125}I (производство Eckert@Ziegler BEBIG GmbH, Berlin, Germany) показали, что локальные дозы облучения онколога-радиолога при применении микроисточников ^{125}I российского производства не отличаются в пределах погрешностей измерений от локальных доз облучения при использовании в тех же условиях импортных микроисточников. Величины нормализованных поглощённых доз (на единицу суммарной активности источников и единицу времени работы онколога-радиолога с микроисточниками ^{125}I российского производства) получены для различных локализаций – для кожи пальцев рук и для глаз. Эти данные могут быть использованы в дальнейшем для оценок ожидаемых доз облучения медицинского персонала при использовании источников различной активности и при работе с ними в течение различных периодов времени.

Ключевые слова: брахитерапия, внутритканевая лучевая терапия, ^{125}I , рак предстательной железы, микроисточники ^{125}I , локальные поглощённые дозы, радиационная безопасность персонала, дозиметрия квантового излучения малой энергии, термолюминесцентная дозиметрия, ТЛ-дозиметры.

Введение

В настоящее время внутритканевая лучевая терапия (брахитерапия) занимает лидирующие позиции в лечении локализованных форм рака предстательной железы наравне с хирургическим лечением и дистанционной лучевой терапией [1]. Внутритканевая лучевая терапия подразделяется на методики постоянной и временной имплантации радиоактивных источников в поражённые ткани. Методика постоянной имплантации микроисточников (низкомощностная брахитерапия) нашла широкое применение в клинической практике [2-4]. Радиоактивные микроисточники на основе ^{125}I , обладающие относительно коротким периодом полураспада и низкой энергией излучения, применяются при брахитерапии с постоянной имплантацией источников в опухоль.

В связи с разработкой отечественных микроисточников ^{125}I , выпускаемых АО «ГНЦ РФ – «Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского» (Обнинск), и проведением их клинических испытаний в МРНЦ им. А.Ф. Цыба (Обнинск) необходимо получение данных о локальных дозах облучения персонала: кожи пальцев рук и глаз онколога-радиолога и медицинского физика, осуществляющих необходимые процедуры на этапах подготовки и проведения операции. Из-за малой энергии фотонного излучения, а также особенностей проведения подготовительных процедур и самой операции, пальцы рук и глаза медицинского персонала могут быть наиболее облучаемыми при брахитерапии рака предстательной железы источниками ^{125}I . При измерениях поглощённых доз от облучения низкоэнергетическими квантами основной проблемой является доказательность результатов измерений, поскольку дозиметры должны быть достаточно чувствительными в диапазоне малых энергий, а энергетическая зависимость их отклика

должна быть известна [5, 6]. Между тем, результаты инструментальных измерений локальных доз облучения персонала при проведении брахитерапии микроисточниками ^{125}I российского производства отсутствуют. Изучение вопросов радиационной безопасности персонала весьма актуально в связи с перспективами широкого внедрения отечественных микроисточников ^{125}I , которые в несколько раз дешевле импортных.

Материалы и методы

Микроисточники ^{125}I

Применённые при клинических испытаниях в МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России (Обнинск) микроисточники ^{125}I выпускаются АО «ГНЦ РФ – «Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского» (Обнинск), изотоп ^{125}I нарабатывается в АО «ГНЦ НИИАР» (Дмитровград).

Характеристики источников: тип распада ^{125}I – электронный захват, период полураспада ($T_{1/2}$) – 60,2 сут, средняя энергия фотонного излучения – 28,33 кэВ (состав и спектр излучения представлен в табл. 1). Излучаемые при распаде электроны внутренней конверсии и Ожэ-электроны полностью поглощаются в материале герметичной капсулы источника. Слой поло-винного ослабления фотонного излучения в мягких тканях организма – около 2 см. Суммарная активность одного комплекта источников – от 1000 до 2000 МБк (8 источников) – рис. 1а и 1б.

Таблица 1

Состав и спектр излучений ^{125}I [7]

Тип излучения	Среднее число частиц или квантов на акт распада	Средняя энергия, МэВ, на частицу/квант
Гамма	0,0666	0,0354
К электроны внутренней конверсии	0,8000	0,0036
L электроны внутренней конверсии	0,1142	0,0309
M электроны внутренней конверсии	0,0190	0,0346
К альфа-1 характеристическое фотонное излучение	0,7615	0,0274
К альфа-2 характеристическое фотонное излучение	0,3906	0,0272
К бета-1 характеристическое фотонное излучение	0,2056	0,0309
К бета-2 характеристическое фотонное излучение	0,0426	0,0318
L характеристическое фотонное излучение	0,2226	0,0037
KLL Ожэ (Auger) электроны	0,1416	0,0226
KLX Ожэ (Auger) электроны	0,0597	0,0264
KXY Ожэ (Auger) электроны	0,0096	0,0301
LMM Ожэ (Auger) электроны	1,5442	0,0029
MXY Ожэ (Auger) электроны	3,6461	0,0008

Рис. 1. Упаковка комплекта (а) и паспорт (б) производимых в АО «ГНЦ РФ – «Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского» микроисточников ^{125}I .

Используемые дозиметры

При измерениях поглощённых доз от облучения низкоэнергетическими квантами основной проблемой является доказательность результатов измерений, поскольку дозиметры должны быть достаточно чувствительными в диапазоне малых энергий, а энергетическая зависимость их отклика должна быть известна. В качестве дозиметров квантового излучения малой энергии были применены миниатюрные (5 ± 1 мм) кристаллы оксида алюминия ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$) подобно тому, как это выполнено нами ранее при измерениях локальных доз облучения персонала от микроисточников ^{32}P и от импортных источников ^{125}I [8, 9]. Они обладают высокой чувствительностью (10^{-6} Гр) при низком дозовом эквиваленте собственного фона (менее 3×10^{-7} Гр), хорошей точностью измерения дозы в диапазоне энергии фотонного излучения от 10 кэВ до 3 МэВ, малым федингом (менее 3% за год), линейной зависимостью в широком диапазоне поглощённых доз, малыми размерами, механической прочностью, химической и радиационной устойчивостью [10]. При средней энергии квантов ^{125}I 28,33 кэВ дозиметры из монокристалла оксида алюминия дают завышенные показания, поэтому была учтена относительная величина фактора завышения, которая равна $2,84 \pm 0,04$ [11] (см. рис. 2).

Рис. 2. Энергетическая зависимость чувствительности $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ дозиметров. R – фактор завышения дозы (доза при энергии гамма-квантов E по отношению к дозе при энергии гамма-квантов 1,17 МэВ, отн. ед.); E – энергия гамма-квантов, кэВ [11].

Применение миниатюрных дозиметров на основе монокристаллов оксида алюминия для измерения локальных доз облучения медицинского персонала

1. Для измерений термостимулированного радиационно-обусловленного люминесцентного излучения (пик люминесценции, соответствующий температуре нагрева 190 °С) от ТЛ-дозиметров на основе кристаллов оксида алюминия ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$) применяется ТЛ-ридер “Harshaw 3500” с использованием методики, отработанной в МРНЦ им. А.Ф. Цыба [8, 9].
2. ТЛ-дозиметры перед началом измерений отжигаются при 500 °С в течение 3 ч.
3. Поскольку применённые дозиметры светочувствительны, то все работы с ними проводятся при красном свете (режим работы фотолаборатории), вне рабочего помещения дозиметры находятся в светонепроницаемых оболочках.

4. В каждой светонепроницаемой оболочке, в условиях электронного равновесия, в виде сборки размещается по три дозиметра общей площадью около $2,7 \text{ см}^2$. В соответствии с условиями НРБ-99/2009 [12] толщина покровного слоя сборки дозиметров равна 40 мг/см^2 (для кожи рук) и 300 мг/см^2 для глаз.

5. Дозиметры размещаются на всех пальцах (боковые поверхности вторых фаланг) обеих рук персонала, а также на очковой оправе – вблизи внешних углов левого и правого глаза и напротив переносицы. Сборки ТЛ-дозиметров закрепляются так, чтобы не создавать помех работе оператора (рис. 3).

6. Параллельно в аналогичном помещении и в аналогичных условиях, но без экспозиции техногенными источниками ионизирующего излучения размещаются по 10 дозиметров для измерения фоновой дозы за период от окончания отжига дозиметров до начала измерения на ТЛ-системе (для измерения фоновой дозы этот период должен быть не менее 3 суток).

Рис. 3. Размещение сборок миниатюрных ТЛ-дозиметров для измерений локальных доз облучения пальцев и глаз онколога-радиолога.

Результаты

Поскольку в сеансе брахитерапии онколог-радиолог участвует как в подготовке («нарезке») микроисточников ^{125}I , так и в операции (введении микроисточников в опухоль), то ожидаемые локальные дозы у онколога-радиолога должны быть наибольшими по сравнению с остальным медицинским персоналом. В табл. 2 приведены результаты измерений локальных доз облучения пальцев обеих рук и глаз онколога-радиолога при работе с микроисточниками ^{125}I российского производства.

В табл. 3 приведены результаты измерений локальных доз облучения пальцев обеих рук медицинского физика, принимавшего участие в «нарезке» и подготовке источников операции при работе с микроисточниками ^{125}I российского производства.

Таблица 2

Результаты измерений локальных доз облучения онколога-радиолога при проведении брахитерапии рака простаты микроисточниками ^{125}I российского производства^{*)}

№ п/п	Локализация дозиметров	Накопленная доза, мГр (указанные погрешности – 1 SD)	Накопленная доза, нормированная на время работы хирурга-радиолога и суммарную активность источников ^{125}I , [мГр/(мин×МБк)]×10 ⁻⁶ (указанные погрешности – 1 SD)
1	большой палец правой руки	0,13±0,014	1,6±0,18
2	указательный палец правой руки	0,25±0,026	3,1±0,33
3	средний палец правой руки	0,33±0,033	4,2±0,41
4	безымянный палец правой руки	0,19±0,021	2,4±0,26
5	мизинец правой руки	0,15±0,016	1,8±0,19
6	большой палец левой руки	0,37±0,038	4,7±0,48
7	указательный палец левой руки	0,52±0,051	6,5±0,64
8	средний палец левой руки	0,48±0,049	6,1±0,62
9	безымянный палец левой руки	0,34±0,038	4,3±0,48
10	мизинец левой руки	0,26±0,029	3,2±0,36
11	правый глаз	0,32±0,032	4,0±0,40
12	переносица	0,10±0,010	1,2±0,12
13	левый глаз	0,10±0,011	1,2±0,13

^{*)}Длительность работы онколога-радиолога во время подготовки источников и операции – 0,983 ч, суммарная активность источников (комплект микроисточников на основе радионуклида ^{125}I для лучевой терапии внутренних органов, паспорт № 71-246-15 от 07.12.2015 г., АО «ГНЦ РФ – «Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского» (Обнинск)) – 1426 МБк. Фоновая доза, накопленная дозиметрами за период времени от момента их отжига до момента измерений, – 2,7±0,16 мГр (фоновая доза вычтена из представленных результатов). В таблице приведены результаты исходных измерений. Поскольку при средней энергии квантов ^{125}I 28,33 кэВ дозиметры из монокристалла оксида алюминия дают завышенные показания, то для коррекции на увеличение чувствительности дозиметров при малой энергии фотонного излучения величины доз, представленные в таблице, следует разделить на фактор 2,84±0,04.

Таблица 3

Результаты измерений локальных доз облучения медицинского физика при «нарезке» и подготовке к операции микроисточников ^{125}I российского производства^{*)}

№ п/п	Локализация дозиметров	Накопленная доза, мГр (указанные погрешности – 1 SD)
1	большой палец правой руки	0,067±0,0083
2	указательный палец правой руки	0,19±0,016
3	средний палец правой руки	0,062±0,009
4	безымянный палец правой руки	0,038±0,0030
5	мизинец правой руки	0,043±0,0085
6	большой палец левой руки	0,090±0,0098
7	указательный палец левой руки	0,47±0,09
8	средний палец левой руки	0,20±0,019
9	безымянный палец левой руки	0,12±0,013
10	мизинец левой руки	0,071±0,009

^{*)}Длительность работы медицинского физика при «нарезке» и подготовке источников к операции – 0,283 ч, суммарная активность источников (комплект микроисточников на основе радионуклида ^{125}I для лучевой терапии внутренних органов, паспорт № 71-246-15 от 07.12.2015 г., АО «ГНЦ РФ – «Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского» (Обнинск)) – 1426 МБк. Фоновая доза, накопленная дозиметрами за период времени от момента их отжига до момента измерений: 2,4±0,13 мГр (фоновая доза вычтена из представленных результатов). В таблице приведены результаты исходных измерений. Поскольку при средней энергии квантов ^{125}I 28,33 кэВ дозиметры из монокристалла оксида алюминия дают завышенные показания, то для коррекции на увеличение чувствительности дозиметров при малой энергии фотонного излучения величины доз, представленные в таблице, следует разделить на фактор 2,84±0,04.

Как следует из табл. 2 и 3, в стандартных условиях проведения брахитерапии рака предстательной железы локальные поглощённые дозы у онколога-радиолога составляют 0,18±0,019 мГр (указательный палец левой руки – наибольший уровень облучения) и 0,053±0,0057 мГр

(мизинец правой руки – наименьший уровень облучения). Поглощённые дозы, соответствующие правому и левому глазу, равны $0,11 \pm 0,012$ мГр и $0,035 \pm 0,0039$ мГр соответственно. Локальные дозы облучения медицинского физика, принимавшего участие в предоперационной подготовке источников («нарезке» микроисточников), равны $0,16 \pm 0,034$ мГр (указательный палец левой руки – наибольший уровень облучения) и $0,013 \pm 0,0012$ мГр (безымянный палец правой руки – наименьший уровень облучения). Здесь указаны величины доз, с учётом фактора завышения доз дозиметрами из монокристалла оксида алюминия, равного $2,84 \pm 0,04$. Указанные различия между правыми и левыми сторонами обусловлены особенностями положения источников по отношению к медицинскому персоналу: при работе радиоактивные источники поддерживаются пальцами левой руки, в то время как пальцами правой руки осуществляются направляющие движения инструментом. При этом источники находились с правой стороны по отношению к голове онколога-радиолога (рис. 4).

Из полученных данных следует, что даже максимальные величины измеренных локальных поглощённых доз не представляют радиационной опасности при использовании для радиотерапии российских микроисточников ^{125}I , т.к. согласно НРБ-99/2009 [12] годовые пределы дозы для населения составляют 50 мЗв в год в кистях, стопах и коже и 15 мЗв в год для глаз. Для персонала (группы Б и А) эти пределы еще выше: в 2,5 и 10 раз соответственно.

Рис. 4. Онколог-радиолог во время введения источников ^{125}I в ткань опухоли.

В табл. 4 приведены результаты измерений локальных доз облучения пальцев обеих рук и глаз онколога-радиолога при работе с импортными микроисточниками ^{125}I (производство Eckert@Ziegler BEBIG GmbH, Berlin, Germany). Для сравнимости полученных данных с дозами облучения от микроисточников российского производства был проведён пересчёт доз к использованной активности российских микроисточников (1426 МБк) и к длительности работы с ними (0,983 ч) – (табл. 2).

В табл. 5 приведены результаты измерений локальных доз облучения пальцев обеих рук медицинского физика при работе с импортными микроисточниками ^{125}I (производство Eckert@Ziegler BEBIG GmbH, Berlin, Germany). Для сравнимости полученных данных с дозами облучения от микроисточников российского производства был проведён пересчёт доз к использованной активности российских микроисточников (1426 МБк) и к длительности работы с ними (0,283 ч) – (табл. 3).

Таблица 4

Результаты измерений локальных доз облучения онколога-радиолога при проведении брахитерапии рака простаты импортными микроисточниками ^{125}I (производство Eckert@Ziegler BEBIG GmbH, Berlin, Germany)^{*)}

№ п/п	Локализация дозиметров	Накопленная доза, мГр (указанные погрешности – 1 SD)	Накопленная доза, нормированная на время работы хирурга-радиолога и суммарную активность источников ^{125}I , [мГр/(мин×МБк)]×10 ⁻⁶ (указанные погрешности – 1 SD) мГр
1	большой палец правой руки	0,15±0,014	1,8±0,17
2	указательный палец правой руки	0,25±0,026	3,0±0,32
3	средний палец правой руки	0,27±0,035	3,2±0,42
4	безымянный палец правой руки	0,16±0,022	1,9±0,27
5	мизинец правой руки	0,15±0,016	1,8±0,18
6	большой палец левой руки	0,43±0,041	5,1±0,52
7	указательный палец левой руки	0,45±0,055	5,4±0,71
8	средний палец левой руки	0,46±0,051	5,5±0,62
9	безымянный палец левой руки	0,37±0,040	4,4±0,49
10	мизинец левой руки	0,25±0,030	2,3±0,29
11	правый глаз	0,31±0,034	3,7±0,42
12	переносица	0,090±0,011	1,1±0,14
13	левый глаз	0,092±0,0090	1,1±0,12

^{*)}Длительность работы онколога-радиолога во время подготовки импортных источников и операции – 0,887 ч, суммарная активность импортных источников (Eckert@Ziegler BEBIG GmbH, Berlin, Germany) – 1229 МБк. Для сравнимости полученных данных с дозами облучения онколога-радиолога от микроисточников российского производства (табл. 2) был проведён пересчёт доз от импортных источников с учётом использованной активности российских микроисточников (1426 МБк) к длительности работы онколога-радиолога с ними (0,983 ч). Фоновая доза, накопленная дозиметрами за период времени от момента их отжига, вычтена из представленных результатов. Поскольку при средней энергии квантов ^{125}I 28,33 кэВ дозиметры из монокристалла оксида алюминия дают завышенные показания, то для коррекции на увеличение чувствительности дозиметров при малой энергии фотонного излучения величины доз, представленные в табл. 4, следует разделить на фактор 2,84±0,04.

Таблица 5

Результаты измерений локальных доз облучения медицинского физика при «нарезке» и подготовке к операции импортных микроисточников ^{125}I (Eckert@Ziegler BEBIG GmbH, Berlin, Germany)^{*)}

№ п/п	Локализация дозиметров	Накопленная доза, мГр (указанные погрешности – 1 SD)
1	большой палец правой руки	0,068±0,0079
2	указательный палец правой руки	0,15±0,018
3	средний палец правой руки	0,067±0,008
4	безымянный палец правой руки	0,047±0,0035
5	мизинец правой руки	0,052±0,0093
6	большой палец левой руки	0,13±0,012
7	указательный палец левой руки	0,35±0,07
8	средний палец левой руки	0,17±0,020
9	безымянный палец левой руки	0,11±0,014
10	мизинец левой руки	0,090±0,011

^{*)}Длительность работы медицинского физика во время подготовки импортных источников и операции – 0,270 ч, суммарная активность импортных источников (Eckert@Ziegler BEBIG GmbH, Berlin, Germany) – 1229 МБк. Для сравнимости полученных данных с дозами облучения медицинского физика от микроисточников российского производства (табл. 3) был проведён пересчёт доз от импортных источников с учётом использованной активности российских микроисточников (1426 МБк) и длительности работы медицинского физика с ними (0,283 ч). Фоновая доза, накопленная дозиметрами за период времени от момента их отжига, вычтена из представленных результатов. Поскольку при средней энергии квантов ^{125}I 28,33 кэВ дозиметры из монокристалла оксида алюминия дают завышенные показания, то для коррекции на увеличение чувствительности дозиметров при малой энергии фотонного излучения величины доз, представленные в табл. 4, следует разделить на фактор 2,84±0,04.

На рис. 5 приведены результаты сравнения локальных доз облучения онколога-радиолога при брахитерапии микроисточниками ^{125}I российского производства с локальными дозами облучения при применении в этих же условиях импортных микроисточников ^{125}I (производство Eckert@Ziegler BEBIG GmbH, Berlin, Germany).

Рис. 5. Сравнение величин локальных доз облучения онколога-радиолога при использовании отечественных микроисточников ^{125}I российского производства (D_2 , мГр) с величинами локальных доз облучения при применении в тех же условиях импортных микроисточников производства Eckert@Ziegler BEBIG GmbH, Berlin, Germany (D_1 , мГр). Приведённые на рисунке интервалы погрешностей соответствуют 1 SD.

Как следует из результатов сравнения (рис. 5), локальные дозы облучения онколога-радиолога при использовании микроисточников ^{125}I российского производства не отличаются в пределах погрешностей измерений от локальных доз облучения при применении в тех же условиях импортных микроисточников. Коэффициент линейной корреляции между двумя рядами величин локальных доз облучения, соответствующих российским и импортным микроисточникам ^{125}I , равен 0,978 ($p < 0,0001$, $n = 13$).

Заключение

Эффективным и малоинвазивным методом терапии рака предстательной железы является внутритканевая лучевая терапия (брахитерапия), суть которой заключается в имплантации закрытых микроисточников ^{125}I в ткань опухоли. В связи с разработкой отечественных микроисточников ^{125}I (микроисточники с ^{125}I , выпускаемые АО «ГНЦ РФ – «Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского» (Обнинск)) и проведением клинических испытаний этих источников в МРНЦ им. А.Ф. Цыба, необходимо получение данных о локальных дозах облучения персонала – кожи пальцев рук и глаз онколога-радиолога и медицинского физика, осуществляющих необходимые процедуры на этапах подготовки и проведения операции. От результатов такой дозиметрии зависит возможность широкой применимости российских микроисточников ^{125}I в радиологических клиниках. Из-за малой энергии фотонного излучения, а также особенностей проведения подготовительных процедур и самой операции пальцы рук и глаза медицинского персонала могут быть наиболее облучаемыми при брахитерапии рака предстательной железы источниками ^{125}I .

При измерениях поглощённых доз от облучения низкоэнергетическими квантами основной проблемой является доказательность результатов измерений, поскольку дозиметры должны быть достаточно чувствительными в диапазоне малых энергий, а энергетическая зависимость их отклика должна быть известна. В качестве автономных накапливающих термолюминесцентных (ТЛ) дозиметров квантового излучения малой энергии (от 10 до 100 кэВ) были использованы миниатюрные (5×1 мм) кристаллы оксида алюминия ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$), с применением отработанной в МРНЦ им. А.Ф. Цыба методики их применения, измерений и калибровки. Измерения этих дозиметров проводили в режиме термической стимуляции люминесценции, испускаемой кристаллами оксида алюминия. Интенсивность пика термостимулированной люминесценции, соответствующего температуре нагрева 190°C , пропорциональна дозе облучения кристаллов. Для измерений применили систему считывания термостимулированной люминесценции "Harshaw 3500".

Дозиметры помещали в светонепроницаемые оболочки. В каждой светонепроницаемой оболочке, в условиях электронного равновесия, в виде сборки размещали по три дозиметра. В соответствии с условиями НРБ-99/2009 площадь сборки дозиметров равна $2,7\text{ см}^2$, толщина подлежащих слоёв в сборках составляла 40 мг/см^2 (для кожи рук) и 300 мг/см^2 для глаз. Дозиметры были размещены на пальцах обеих рук медицинского персонала, а также вблизи глаз онколога-радиолога. Сборки ТЛ-дозиметров закрепляли, чтобы не создавать помехи работе персонала.

Установлено, что в стандартных условиях проведения брахитерапии рака предстательной железы локальные поглощённые дозы у онколога-радиолога составляют $0,18 \pm 0,019\text{ мГр}$ (указательный палец левой руки – наибольший уровень облучения) и $0,053 \pm 0,0057\text{ мГр}$ (мизинец правой руки – наименьший уровень облучения). Поглощённые дозы, соответствующие правому и левому глазу, равны $0,11 \pm 0,012\text{ мГр}$ и $0,035 \pm 0,0039\text{ мГр}$ соответственно. Локальные дозы облучения медицинского физика, принимавшего участие в предоперационной подготовке источников («нарезке» микроисточников), равны $0,16 \pm 0,034\text{ мГр}$ (указательный палец левой руки – наибольший уровень облучения) и $0,013 \pm 0,0012\text{ мГр}$ (безымянный палец правой руки – наименьший уровень облучения).

Фоновая доза была учтена при анализе результатов измерений локальных доз облучения персонала микроисточниками ^{125}I . Указанные различия между правыми и левыми сторонами обусловлены особенностями положения источников по отношению к медицинскому персоналу: при работе радиоактивные источники поддерживаются пальцами левой руки, в то время как пальцами правой руки осуществляются направляющие движения инструментом. При этом источники находились с правой стороны по отношению к голове онколога-радиолога.

Из полученных данных следует, что даже максимальные величины измеренных локальных поглощённых доз не представляют радиационной опасности при использовании для радиотерапии российских микроисточников ^{125}I , так как, согласно НРБ-99/2009, пределы дозы для населения составляют 50 мЗв в год в кистях, стопах и коже и 15 мЗв в год для глаз. Для персонала (группы Б и А) эти пределы еще выше: в 2,5 и 10 раз соответственно.

Измерения локальных доз облучения персонала при использовании для целей брахитерапии импортных микроисточников ^{125}I (производство Eckert@Ziegler BEBIG GmbH, Berlin, Germany) показали, что локальные дозы облучения медицинского персонала при применении микроисточников ^{125}I российского производства не отличаются в пределах погрешностей измерений от локальных доз облучения при применении в тех же условиях импортных микроисточников.

Величины нормализованных поглощённых доз (на единицу суммарной активности источников и единицу времени работы онколога-радиолога с микроисточниками ^{125}I российского производства) получены для различных локализаций – для кожи пальцев рук и для глаз. Эти данные могут быть использованы в дальнейшем для оценок ожидаемых доз облучения медицинского персонала при использовании источников различной активности и при работе с ними в течение различных периодов времени.

Выводы

1. Разработанная и реализованная в МРНЦ им. А.Ф. Цыба технология измерения локальных доз облучения медицинского персонала с применением миниатюрных ТЛ-дозиметров обеспечивает возможность получения инструментальных оценок локальных поглощённых доз при облучении персонала низкоэнергетическими фотонами. Диапазон измеряемых доз (от сотых долей мГр и более) обеспечивает доказательность полученных результатов в отношении радиационной безопасности медицинского персонала. Это является принципиально важным для широкого применения и распространения в радиологических клиниках методов радиотерапии онкологических заболеваний с использованием источников ионизирующего квантового излучения малой энергии, обеспечивающих локальное радиационное воздействие на опухоль, в частности, брахитерапии микроисточниками ^{125}I российского производства.

2. При стандартных условиях проведения брахитерапии рака предстательной железы микроисточниками ^{125}I российского производства наибольшая локальная накопленная доза облучения медицинского персонала (онколог-радиолог) равна $0,18 \pm 0,019$ мГр (указательный палец левой руки). Наибольшая доза облучения глаз (правый глаз) равна $0,11 \pm 0,012$ мГр.

3. Из полученных данных следует, что даже максимальные величины измеренных локальных поглощённых доз не представляют радиационной опасности при использовании для радиотерапии российских микроисточников ^{125}I , т.к. согласно НРБ-99/2009 пределы дозы для населения составляют 50 мЗв в год в кистях, стопах и коже и 15 мЗв в год для глаз. Для персонала (группы Б и А) эти пределы еще выше: в 2,5 и 10 раз соответственно.

4. Измерения локальных доз облучения персонала при брахитерапии рака предстательной железы импортными микроисточниками ^{125}I (производство Eckert@Ziegler BEBIG GmbH, Berlin, Germany) показали, что локальные дозы облучения медицинского персонала при применении в тех же условиях микроисточников ^{125}I российского производства не отличаются в пределах погрешностей измерений от локальных доз облучения при использовании импортных микроисточников ^{125}I .

5. Величины нормализованных поглощённых доз (на единицу суммарной активности источников и единицу времени работы онколога-радиолога с микроисточниками ^{125}I российского производства) получены для различных локализаций: для кожи пальцев рук и для глаз. Эти данные могут быть использованы в дальнейшем для оценок ожидаемых доз облучения медицинского персонала при использовании российских микроисточников ^{125}I различной активности и при работе с ними в течение различных периодов времени.

Данное исследование было выполнено в Медицинском радиологическом научном центре им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «Национальный медицинский исследовательский радиологический центр» Минздрава России в рамках НИР по Государственному заданию «Разработка новых технологий ядерной медицины и оптимизация лучевой терапии онкологических заболеваний» (2015-2017 гг.). № Государственной регистрации 115050610007. Утверждено зам. министра Министерства здравоохранения России С.А. Краевым 28.01.2015 г.

Литература

1. Каприн А.Д., Галкин В.Н., Иванов С.А. Роль брахитерапии в лечении локализованных форм рака предстательной железы //Biomedical Photonics. 2015. Т. 4, № 4. С. 21-26.
2. Иванов С.А. Брахитерапия как метод радикального лечения при раке предстательной железы: дис. ... док. мед. наук. М., 2011. 265 с.
3. Иванов С.А., Каприн А.Д., Миленин К.Н., Альбицкий И.А., Иваненко К.В. Результаты применения низкодозной брахитерапии в качестве радикального лечения при раке предстательной железы //Диагностическая и интервенционная радиология. 2015. Т. 5, № 1. С. 73-76.
4. Каприн А.Д., Паньшин Г.А., Альбицкий И.А., Миленин К.Н., Цыбульский А.Д. Брахитерапия локализованного рака предстательной железы (медицинская технология). [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ncrr.ru/nauka/new-technology/brakhiterapiya-lokalizovannogo-raka-predstatelnoy-zhelezy> (дата обращения 25.08.2016).
5. Иванов С.И., Аكوпова Н.А., Ермолина Е.П., Летов В.Н., Перцов В.А., Наркевич Б.Я., Зиновьева Н.П., Мацука Д.Г., Глухов С.Б., Попов С.В., Кузнецов М.А., Хромов А.П., Махрова Т.М., Жажа В.А., Левчук А.В. Гигиенические требования по обеспечению радиационной безопасности при внутритканевой лучевой терапии (брахитерапии) методом имплантации закрытых радионуклидных источников: методические указания. МУ 2.6.1.2712-10. М.: Государственное санитарно-эпидемиологическое нормирование Российской Федерации, 2010. 12 с.
6. ICRP, 1998. Radiation Aspects of Brachytherapy for Prostate Cancer. ICRP Publication 98 //Ann. ICRP. 2005. V. 35, N 3.
7. Dillman L., Lage F. Radionuclide decay schemes and nuclear parameters for use in radiation-dose estimation. NM/MIRD Pamphlet No 10. Medical Internal Radiation Dose Committee, Society of Nuclear Medicine. N.Y., 1975. 119 p.
8. Степаненко В.Ф., Колыженков Т.В., Дубов Д.В., Цыб А.Ф. Дозы облучения персонала при брахитерапии злокачественных новообразований микроисточниками ^{32}P //Атомная энергия. 2008. Т. 105, № 4. С. 233-235.
9. Степаненко В.Ф., Колыженков Т.В., Панарина Н.Т., Цыб А.Ф. Дозы облучения персонала при брахитерапии рака предстательной железы микроисточниками ^{125}I //Атомная энергия. 2007. Т. 103, № 2. С. 125-128.
10. Akselrod M.S., Kortov V.S., Kravetsky D.J., Gotlib V.I. Highly sensitive thermoluminescent anion-defective $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ single crystal detectors //Radiat. Prot. Dosim. 1990. V. 33, N 4. P. 119-122.
11. Olko P., Bilski P., El-Faramawy N.A., Goksu H.Y., Kim J.L., Kopec R., Waligorski M.P. On the relationship between dose-, energy- and LET-response of thermoluminescent detectors //Radiat. Prot. Dosim. 2006. V. 119, N 1-4. P. 15-22.
12. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СанПин 2.6.1.252309. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.

Local absorbed doses of irradiation of medical personnel at brachytherapy of prostate cancer using ^{125}I microsources of Russian production

Stepanenko V.F., Biryukov V.A., Karjakin O.B., Kaprin A.D., Galkin V.N., Ivanov S.A., Mardinskiy Yu.S., Kolyzhenkov T.V., Petukhov A.D., Bogacheva V.V., Akhmedova U.A., Yaskova E.K., Lepilina O.G., Sanin D.B., Skvortsov V.G., Ivannikov A.I., Khailov A.M., Anokhin Yu.N.

A. Tsyb MRRC, Obninsk

Brachytherapy with microsources of ^{125}I is effective and minimally invasive method of radiation therapy of prostate cancer. At present moment the "State National Center of Russian Federation – Physical-Energetic Institute named after A.I. Leipunskiy" (Obninsk) is producing ^{125}I microsources for treatment of prostate cancer. The Medical Radiological Research Center named after A.F. Tsyb (MRRC, Obninsk) is responsible for clinical trials of these radioactive sources. In connection with these circumstances it is necessary to obtain information about local radiation doses of personnel – irradiation the skin of the fingers and eyes of radiation oncologist and medical physicist, performing necessary procedures at the stages of preparation and conduction of the operation with ^{125}I microsources of Russian production. Results of such dosimetry are very important for wide dissemination and implementation of ^{125}I microsources of Russian production in the radiological clinics. Due to low energy of photon irradiation, as well as due to features of the preparatory procedures and the operation itself, fingers and eyes of medical staff may be the most irradiated locations of the body during the brachytherapy of prostate cancer with ^{125}I sources. The radionuclide ^{125}I decays by electron capture mode with a half-life of 60.2 d, emits characteristic photon radiation (average energy of 28.33 keV, the layer of half attenuation in soft tissue is about 2 cm), electrons of internal conversion and Auger-electrons (these electrons are completely absorbed in the material of the sealed capsule of source). When measuring the absorbed doses from low-energy radiation quanta, the main problem is the validity of measurement results, because the dosimeters must be sensitive enough in the range of low energies and the energy dependence of their response must be known. For dosimetry of irradiation from ^{125}I microsources during brachytherapy the miniature crystals of aluminum oxide ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$) were used as thermoluminescent (TL) dosimeters of low energy quantum radiation. The intensity of thermo stimulated luminescence emitted by crystals of aluminum oxide is proportional to radiation dose. The "Harshaw 3500" TL reader was used for measurements of thermo stimulated luminescence. The dosimeters were placed in light-tight envelopes. The three dosimeters were placed in the conditions of electronic equilibrium in each opaque envelop. The area of each set of dosimeters is equal to 2.7 cm^2 , the thickness of the covering layers of dosimeters is equal to 40 mg/cm^2 (for the skin of hands) and 300 mg/cm^2 for eyes (in accordance with the terms of the Russian Radiation Safety Standards RSS-99/2009). Dosimeters were placed on the all fingers of both hands of medical personnel, as well as near eyes of radiation oncologist. At average energy of ^{125}I quantum irradiation (28.33 keV) the aluminum oxide dosimeters provides increased values of doses – value of factor of overestimation of dose in relation to the dose from irradiation by high energy gammas is equal to 2.84 ± 0.04 . Therefore the measured values of absorbed doses have been reduced by the value of this factor. It was shown that under standard conditions of brachytherapy of prostate cancer, the local absorbed doses of radiation oncologist are equal to $0.18 \pm 0.019\text{ mGy}$ (in the skin of index finger of the left hand – the highest dose) and $0.053 \pm 0.0057\text{ mGy}$ (in the skin of little finger of the right hand – the smallest dose). The absorbed doses in right and left eyes, are equal to $0.11 \pm 0.012\text{ mGy}$ and $0.035 \pm 0.0039\text{ mGy}$, respectively. Local absorbed doses of medical physicist are equal to $0.16 \pm 0.034\text{ mGy}$ (in the skin of index finger of the left hand – the highest dose) and $0.013 \pm 0.0012\text{ mGy}$ (in the skin of ring finger of the right hand – the lowest dose). The background dose was taken into account when analyzing the results of measurements of the local exposure of personnel by ^{125}I microsources. The differences between the right and left sides of personnel's body can be explained by peculiarities of location of radioactive sources in relation to the bodies of medical staff: the radioactive sources were supported by the fingers of the left hand his and the right hand were in motion with the tool. The radioactive sources were located on the right side in relation to the head of radiation oncologist. It was concluded that even the maximum value of the measured local absorbed doses do not present a radiation hazard during radiotherapy by ^{125}I microsources of Russian production, as far as according to Russian Radiation Safe-

Stepanenko V.F.* – Head of Lab., D. Sc., Biol., Prof.; Biryukov V.A. – Senior Researcher, C. Sc., Med.; Karyakin O.B. – Head of Dep., MD, Prof.; Kaprin A.D. – General Director, Academician of RAS, MD, Prof.; Galkin V.N. – Director, MD, Prof.; Ivanov S.A. – Deputy Director, MD; Mardinskiy Yu.S. – Head of Dep., Corresponding Member of RAS, MD, Prof.; Kolyzhenkov T.V. – Senior Researcher, C. Sc., Biol.; Petukhov A.D. – Research Assistant; Bogacheva V.V. – Engineer; Akhmedova U.A. – Engineer; Yaskova E.K. – Lead. Researcher, C. Sc., Biol.; Lepilina O.G. – Med. Physicist; Sanin D.B. – Med. Physicist, C. Sc., Biol.; Skvortsov V.G. – Head of Lab., C. Sc., Biol.; Ivannikov A.I. – Lead. Researcher, C. Sc., Phys.-Math.; Khailov A.M. – Senior Researcher, C. Sc., Biol.; Anokhin Yu.N. – Senior Researcher, C. Sc., Med. A. Tsyb MRRC.

*Contacts: 4 Korozyov str., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249036. Tel.: (484) 399-70-02; e-mail: mrrc@mrrc.obninsk.ru.

ty Standards (RSS-99/2009) annual dose limits for population is 50 mSv/year for hands, feet and skin and 15 mSv/year for eyes. For staff (groups B and A), these limits are even higher: to 2.5 and 10 times, respectively. Measuring of local radiation doses of medical personnel at brachytherapy by imported ^{125}I microsources (production of Eckert@Ziegler BEBIG GmbH, Berlin, Germany) showed that local radiation doses of radiation oncologist at brachytherapy by ^{125}I microsources of Russian production do not differ within the experimental errors from local doses when imported microsources were used in the same conditions. The magnitudes of the normalized absorbed doses (per unit of total activity of sources and per unit of time of the work of radiation oncologist with ^{125}I microsources of Russian production) were obtained for various localizations – the skin of the fingers and the eyes. These data can be used for estimates of expected local absorbed doses to medical personnel at brachytherapy with ^{125}I microsources of Russian production with different activity and for various durations of work.

Key words: *brachytherapy, interstitial radiotherapy, ^{125}I , prostate cancer, ^{125}I microsources, local absorbed doses of irradiation, radiation safety of personnel, dosimetry of low-energy quantum radiation, thermoluminescent dosimetry, TL-dosimeters.*

References

1. **Kaprin A.D., Galkin V.N., Ivanov S.A.** Rol' brachiterapii v lechenii lokalizovannykh form raka predstatel'noj zhelezy [The role of brachytherapy in the treatment of localized prostate cancer]. *Biomedical Photonics*, 2015, vol. 4, no. 4, pp. 21-26.
2. **Ivanov S.A.** Brachiterapija kak metod radikal'nogo lechenija pri rake predstatel'noj zhelezy. Diss. dokt. med. nauk [Brachytherapy as a method of radical treatment of prostate cancer. Dr. med. sci. diss.]. Moscow, 2011, 265 p.
3. **Ivanov S.A., Kaprin A.D., Milenin K.N., Al'bickij I.A., Ivanenko K.V.** Rezul'taty primeneniya nizkodoznoj brachiterapii v kachestve radikal'nogo lechenija pri rake predstatel'noj zhelezy [Results of application of low-dose brachytherapy as a radical treatment of prostate cancer]. *Diagnostichestskaja i intervencionnaja radiologija – Diagnostical and Interventional Radiology*, 2015, vol. 5, no. 1, pp. 73-76.
4. **Kaprin A.D., Pan'shin G.A., Al'bickij I.A., Milenin K.N., Cybul'skij A.D.** Brachiterapija lokalizovannogo raka predstatel'noj zhelezy (medicinskaja tehnologija) [Brachytherapy of localized prostate cancer: medical technology]. Available at: <http://www.rncrr.ru/nauka/new-technology/brachiterapija-lokalizovannogo-raka-predstatel'noj-zhelezy> (Accessed 26 August 2016).
5. **Ivanov S.I., Akopova N.A., Ermolina E.P., Letov V.N., Percov V.A., Narkevich B.Ja., Zinov'eva N.P., Macuka D.G., Gluhov S.B., Popov S.V., Kuznecov M.A., Hromov A.P., Mahrova T.M., Zhazha V.A., Levchuk A.V.** Gigienicheskie trebovanija po obespečeniju radiacionnoj bezopasnosti pri vnutritkanevoj luchevoj terapii (brachiterapii) metodom implantacii zakrytykh radionuklidnykh istochnikov: Metodicheskie Ukazaniya. MU 2.6.1.2712-10 [Hygienic requirements of radiation safety in intratissue radiation therapy (brachytherapy) by implantation of sealed radionuclide sources. Guidance 2.6.1.2712-10]. Moscow, State sanitary and hygiene regulation of Russian Federation, 2010. 12 p.
6. ICRP, 1998. Radiation Aspects of Brachytherapy for Prostate Cancer. ICRP Publication 98. *Ann. ICRP*, 2005, vol. 35, no. 3.
7. **Dillman L., Lage F.** Radionuclide decay schemes and nuclear parameters for use in radiation-dose estimation. NM/MIRD Pamphlet No 10, Medical Internal Radiation Dose Committee, Society of Nuclear Medicine. N.Y., 1975, 119 p.
8. **Stepanenko V.F., Kolyzhenkov T.V., Dubov D.V., Tsyb A.F.** Dozy obluchenija personala pri brachiterapii zlokachestvennykh novoobrazovanij mikroistochnikami ^{32}P [Doses of irradiation of personnel at brachytherapy of malignant neoplasms by microsources of ^{32}P].

- py of malignant neoplasms by ^{32}P microsources]. *Atomnaja jenergija – Atomic Energy*, 2008, vol. 105, no. 4, pp. 233-235.
9. **Stepanenko V.F., Kolyzhenkov T.V., Panarina N.T., Tsyb A.F.** Dozy obluchenija personala pri brahiterapii raka predstatel'noj zhelezy mikroistochnikami ^{125}I [Doses of irradiation of personnel at brachytherapy of prostate cancer by ^{125}I microsources]. *Atomnaja jenergija – Atomic Energy*, 2007, vol. 103, no. 2, pp. 125-128.
 10. **Akselrod M.S., Kortov V.S., Kravetsky D.J., Gotlib V.I.** Highly sensitive thermoluminescent anion-defective $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3\text{:C}$ single crystal detectors. *Radiat. Prot. Dosim.*, 1990, vol. 33, no. 4, pp. 119-122.
 11. **Olko P., Bilski P., El-Faramawy N.A., Goksu H.Y., Kim J.L., Kopec R., Waligorski M.P.** On the relationship between dose-, energy- and LET-response of thermoluminescent detectors. *Radiat. Prot. Dosim.*, 2006, vol. 119, no. 1-4, pp.15-22.
 12. Normy radiacionnoj bezopasnosti (NRB-99/2009). SanPin 2.6.1.252309 [Radiation safety standards (RSS-99/2009). SanPin 2.6.1.252309]. Moscow, Federal center of hygiene and epidemiology of Rospotrebnadzor, 2009. 100 p.