

## Исследование активации легких ядер в крови человека при проведении высокоэнергетической лучевой терапии

М.В. Желтоножская,<sup>1,\*</sup> П.Д. Ремизов,<sup>1</sup> М.В. Ленивкин,<sup>1</sup>  
 Е.Н. Лыкова,<sup>1</sup> А.П. Черняев,<sup>1</sup> В.Н. Яценко,<sup>2</sup> О.В. Яценко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова  
 Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

<sup>2</sup>Федеральный медико-биофизический центр имени А.И. Бурназяна  
 Россия, 123098, Москва, ул. Маршала Новикова, д. 23

(Поступила в редакцию 26.08.2022; после доработки 07.03.2023; принята к публикации 28.05.2023)

Проведена серия экспериментов по изучению активации тормозным излучением некоторых химических элементов в венозной крови человека при проведении лучевой терапии на линейном медицинском ускорителе с энергией пучка 20 МэВ. При таком режиме работы ускорителя целый ряд легких элементов в крови пациента в результате  $(\gamma, n)$ -реакций активируется в виде позитрон-излучающих радионуклидов. Впервые измерена позитронная активность  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{30}\text{P}$ ,  $^{34m}\text{Cl}$  и  $^{38}\text{K}$  в облученных образцах венозной крови человека. Сделан вывод, что наибольший вклад в формирование дозы внутреннего облучения от позитрон-излучающих радионуклидов вносят  $^{15}\text{O}$ ,  $^{34m}\text{Cl}$  и  $^{38}\text{K}$ .

PACS: 89.90.+n, 24.30.Cz УДК: 53.09, 539.1

Ключевые слова: лучевая терапия, медицинский линейный ускоритель, энергия пучка 20 МэВ, тормозное излучение, фотоядерные реакции, кровь человека, активация, позитрон-излучающие радионуклиды.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2340701](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2340701)

### ВВЕДЕНИЕ

Линейные ускорители электронов играют важную роль в успехах современной медицины при излечении многих злокачественных образований. В настоящее время медицинский линейный ускоритель является необходимым оборудованием современного отделения лучевой терапии.

В отделениях лучевой терапии в основном используются медицинские линейные ускорители электронов с граничной энергией тормозного фотонного излучения в диапазоне от 6 до 20 МэВ. Ускорители с большей энергией пучка не нашли широкого применения в клинической практике, так как в этом случае кривые глубинного распределения дозы теряют свой резкий спад из-за увеличения интенсивности тормозного излучения. При проведении лечения на медицинском линейном ускорителе электронов тормозные фотоны с энергией свыше 8 МэВ формируют вторичную активность в конструкционных материалах ускорителя и организме пациента за счет фотоядерных реакций. Образование вторичных частиц при взаимодействии высокоэнергетических пучков тормозного излучения с телом пациента детально начали изучать с середины 1970-х гг. [1–7].

Тем не менее экспериментальные и теоретические оценки доз от фотоядерных реакций для тканей

и органов пациента при проведении высокоэнергетической лучевой фотонной терапии все еще значительно расходятся [8]. Кроме того, в этих исследованиях оценивались в основном дозы, обусловленные вторичными нейтронами, протонами и альфа-частицами. Однако, наряду с вторичным нейтронным излучением, при проведении высокоэнергетической лучевой фотонной терапии активируются и позитрон-излучающие радионуклиды в различных тканях и органах пациента [9, 10], в том числе и в крови.

Как известно, кровь представляет собой жидкую соединительную ткань, состоящую из плазмы и форменных элементов. Кровь, её циркуляция в органах и тканях, является необходимым условием их функционирования. Выполняя транспортную и коммуникационную функции, кровь поставляет питательные вещества, гормоны и кислород клеткам. В обратном направлении в кровь поступают продукты обмена и гормоны.

Таблица 1. Репрезентативный элементный состав крови (в процентах от массы) взрослого мужчины по данным [13]

Кровь	$^1\text{H}$	$^{12}\text{C}$	$^{14}\text{N}$	$^{16}\text{O}$	$^{31}\text{P}+^{39}\text{K}+^{35}\text{Cl}\dots$
	10.2	11	3.3	74.5	< 0.4

Объем крови в организме человека — величина относительно постоянная и оценивается как 4.5–6.0 л или  $\sim 7\%$  от массы те-

\* E-mail: [mv.zhelton@physics.msu.ru](mailto:mv.zhelton@physics.msu.ru)

Таблица 2. Фотоядерные реакции в крови человека с образованием позитрон-излучающих нуклидов при проведении лучевой терапии с энергией пучка 20 МэВ [14, 15]

Элемент	Фотоядерная реакция	Порог реакции, МэВ	Период полураспада наработанного нуклида, $T_{1/2}$	Граничная энергия позитронов $E_{гр}$ , МэВ
Углерод	$^{12}\text{C}(\gamma, n)^{11}\text{C}$	18.7	20.39 мин	1.0
Азот	$^{14}\text{N}(\gamma, n)^{13}\text{N}$	10.6	9.96 мин	1.2
Кислород	$^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$	15.7	122.24 с	1.7
Фосфор	$^{31}\text{P}(\gamma, n)^{30}\text{P}$	12.3	2.45 мин	3.2
Хлор	$^{35}\text{Cl}(\gamma, n)^{34m}\text{Cl}$	10.3	32 мин	4.5
Калий	$^{39}\text{K}(\gamma, n)^{38}\text{K}$	7.8	7.64 мин	2.7

ла [11]. Общее время кровообращения составляет в среднем  $\sim 21\text{--}26$  с [12]. В табл. 1 приведен репрезентативный элементный состав крови взрослого мужчины.

Так как основным требованием к радиационной защите пациентов является максимально возможное снижение дозы в нормальных тканях и органах, окружающих объект лечения, исследование активации радионуклидов в крови человека при проведении высокоэнергетической фотонной лучевой терапии является достаточно актуальной задачей.

В табл. 2 перечислены возможные фотоядерные реакции, которые приводят к образованию позитрон-излучающих радионуклидов в организме пациента при проведении высокоэнергетической лучевой терапии и граничные энергии позитронов. Активированные позитрон-излучающие радионуклиды доставляются кровью непосредственно к здоровым органам и тканям как при проведении лучевой терапии с помощью медицинских линейных ускорителей с энергией 20 МэВ, так и после останковки ускорителя.

Позитроны, образующиеся при радиоактивном распаде активированных радионуклидов, тормозятся в теле человека, как и высокоэнергетические электроны, главным образом через ионизационные потери, тем самым увеличивая итоговую дозу, получаемую пациентом при лечении. Кроме того, после уменьшения энергии позитронов до 0 происходит двухквантовая аннигиляция на свободных электронах с испусканием двух фотонов с энергией 511 кэВ.

Таким образом, при проведении 20 МэВ лучевой терапии не учитывается поглощенная доза от позитрон-излучающих нуклидов, активированных в крови пациента в процессе облучения, которые кровь доставляет прямо к критическим органам человека. Причем эта недоучтенная доза состоит из двух компонент — внутренней поглощенной дозы от высокоэнергетических бета-частиц и аннигиляционных гамма-квантов.

## 1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Целью представленной работы было исследование активации позитрон-излучающих нуклидов

в крови человека при проведении лучевой терапии с энергией пучка 20 МэВ. Для этого проводилась серия облучений образцов крови на линейном медицинском ускорителе Varian Trilogy. Этот ускоритель оснащен встроенным 120-лепестковым коллиматором с шириной центрального лепестка 2.5 мм для формирования терапевтических полей от  $0.5 \times 0.5$  см<sup>2</sup> до  $40 \times 40$  см<sup>2</sup>. Он может работать в двух режимах, формируя пучки тормозного фотонного излучения с граничной энергией 6 МэВ и 20 МэВ.

Облучение образцов венозной крови объемом 20 мл проводилось в течение 8, 11 и 20 мин пучками тормозного излучения с граничной энергией 20 МэВ. Забор донорской цельной крови проводился у двух доноров, взрослых мужчин, на добровольной основе в соответствии с действующими инструкциями и нормативными актами Российской Федерации; от каждого донора получено информированное согласие. Закрытая чашка Петри с кровью устанавливалась на плоскую мониторную мишень тантала ( $^{181}\text{Ta}$ ) диаметром 35 мм на кушетке в поле пучка на расстоянии 1 м от головки ускорителя. Размер поля облучения составлял  $10 \times 10$  см<sup>2</sup>. По окончании облучения кровь переливалась в необлученную закрытую чашку Петри для последующих измерений.

Так как исследуемые позитрон-излучающие радионуклиды (табл. 2), кроме  $^{38}\text{K}$  и  $^{34m}\text{Cl}$ , являются чистыми бета-излучателями и не имеют выходов гамма-квантов, кроме аннигиляционных, то основные исследования проводились по аннигиляционному выходу 511 кэВ. Для разделения активностей исследуемых нуклидов по периоду полураспада измерения облученных образцов крови проводились через 10 мин после окончания облучения на двух сцинтилляционных спектрометрах и полупроводниковом HPGe-спектрометре Canberra® с разными временными интервалами. На одном сцинтилляционном спектрометре с энергетическим разрешением 6.9% измерения проводились с интервалом 2 мин (10 измерений), на втором сцинтилляционном спектрометре с энергетическим разрешением 7.8% — с интервалом 10 мин (5 измерений), на полупроводниковом HPGe спектрометре — с интервалом 30 мин (3 измерения). Энергетическое разре-

шение HPGe-спектрометра составляло 1.8 кэВ по  $\gamma$ -линии 1332 кэВ  $^{60}\text{Co}$ . Для калибровки сцинтилляционных спектрометров использовались калибровочные источники  $^{85}\text{Sr}$  ( $\gamma$ -линия 514 кэВ) и  $^{137}\text{Cs}$  ( $\gamma$ -линия 661 кэВ). Для калибровки HPGe-спектрометра использовались калибровочные источники  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{182}\text{Ta}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ .

В полученных гамма-спектрах наблюдались гамма-переходы, сопутствующие распадам  $^{34m}\text{Cl}$ ,  $^{24}\text{Na}$ ,  $^{38}\text{K}$ , и интенсивный аннигиляционный пик (см. рис. 1 и 2).

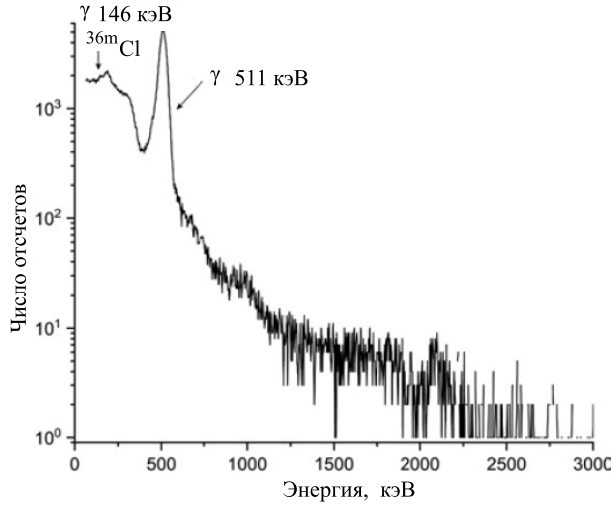


Рис. 1. Спектр облученного образца крови человека, измеренный с использованием сцинтилляционного спектрометра

При использовании полученных из гамма-спектров сцинтилляционных детекторов данных об активностях в каждом интервале времени и данных о периодах полураспада исследуемых нуклидов была составлена серия уравнений в виде:

$$A = \sum A_i, \text{ где } A_i = A_{i0}(1 - e^{-\lambda_i t_m}) \cdot e^{-\lambda_i t_p}. \quad (1)$$

где  $A_i$  — позитронная активность соответствующего нуклида в конце измерений, Бк;  $\lambda_i$  — постоянная распада соответствующего нуклида,  $\text{с}^{-1}$ ;  $t_m$  — время измерения, с;  $t_p$  — время паузы между окончанием облучения и началом измерения, с;  $A_{i0}$  — позитронная активность соответствующего нуклида на конец облучения.

В результате с использованием метода наименьших квадратов (рис. 3) и данных об активности  $^{34m}\text{Cl}$  и  $^{38}\text{K}$ , полученных по гамма-линиям 146 кэВ и 2167 кэВ из гамма-спектров образца крови, измеренного на HPGe-спектрометре, были получены активности позитрон-излучающих радионуклидов, нарабатанных в крови человека:  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{34m}\text{Cl}$ ,  $^{38}\text{K}$  и суммарная активность  $^{15}\text{O} + ^{30}\text{P}$  (табл. 3).

Последнюю пару радионуклидов из-за близости их периодов полураспада (табл. 2) разделить вышеописанным методом сложно. Поэтому для определения активности  $^{15}\text{O}$  и  $^{30}\text{P}$  использовался акти-

вационный подход. Поскольку по определению активность генерируемого радионуклида равна произведению числа атомов в исходной мишени ( $N$ ), потока ( $F$ ) и выхода реакции ( $Y$ ) с учетом времени активации был составлен ряд уравнений:

$$A_0 = \sum A_{i0}, \text{ где } A_{i0} = N_i \cdot F \cdot Y_i(1 - e^{-\lambda_i t_{irr}}), \quad (2)$$

где  $A_{i0}$  — позитронная активность соответствующего нуклида на конец облучения;  $t_{irr}$  — время облучения образца крови.

Суммарный поток тормозных  $\gamma$ -квантов ( $F$ ) оценивался с использованием реакции  $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$  на мониторинг мишени тантала. В процессе облучения в ней образуется  $^{180}\text{Ta}$ , распадающийся с  $T_{1/2} = 8$  ч. Для оценки потока определялись площади фотопиков  $\gamma$ -линий 93.3 или 103.6 кэВ из распада  $^{180}\text{Ta}$  (рис. 4) и средневзвешенный выход реакции  $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ . Этот выход определялся в результате сверстки с шагом 1 МэВ по формуле:

$$Y_{A@} = \frac{\sum_{i=1}^N \sigma_i \phi_i}{\sum_{i=1}^N \phi_i}, \quad (3)$$

где  $\sigma_i$  — табличные значения сечения реакции  $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$  для монохроматических  $\gamma$ -квантов [16];  $\phi_i$  — относительные величины потока, смоделированного в Geant4 [17] спектра тормозных  $\gamma$ -квантов (рис. 5).

После этого суммарный поток тормозных  $\gamma$ -квантов рассчитывался по формуле,  $n_\gamma \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  [18]:

$$F = \frac{S \lambda A}{(1 - e^{-\lambda t_{irr}}) e^{-\lambda t_c} (1 - e^{-\lambda t_m}) \xi k \eta Y_{A@} N_A m p}, \quad (4)$$

где  $S$  — площадь фотопика, соответствующего распаду  $^{180}\text{Ta}$ ;  $\eta$  — квантовый выход при распаде  $^{180}\text{Ta}$ ;  $\xi$  — эффективность регистрации  $\gamma$ -квантов, сопровождающих распад ядер продуктов реакции  $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ ;  $t_{irr}$ ,  $t_m$ ,  $t_p$  — времена облучения, измерения и паузы соответственно (с);  $k$  — коэффициент самопоглощения  $\gamma$ -квантов распада;  $p$  — абсолютное содержание  $^{181}\text{Ta}$  в естественной смеси;  $N_A$  — число Авогадро;  $Y$  — средневзвешенный выход реакции  $^{181}\text{Ta}(\gamma, n)^{180}\text{Ta}$ , рассчитанный согласно (3) (бн);  $m$  — масса мишени тантала нормированная на  $\text{см}^2$ , г.

Количество атомов соответствующего стабильного исходного изотопа в образце крови ( $^{16}\text{O}$  и  $^{31}\text{P}$ ) оценивали по уравнению

$$N_i = \frac{N_A \cdot m \cdot p}{A}. \quad (5)$$

Формула (5) включает  $N_A$  — число Авогадро,  $m$  — массу облучаемого образца крови, г;  $A$  — атомный номер исходного стабильного изотопа кислорода или фосфора и  $p$  — исходное содержание стабильного изотопа кислорода или фосфора в образце с учетом изотопного содержания. Данные об исходном содержании кислорода и фосфора в 1 мл крови человека были взяты из [12, 19].

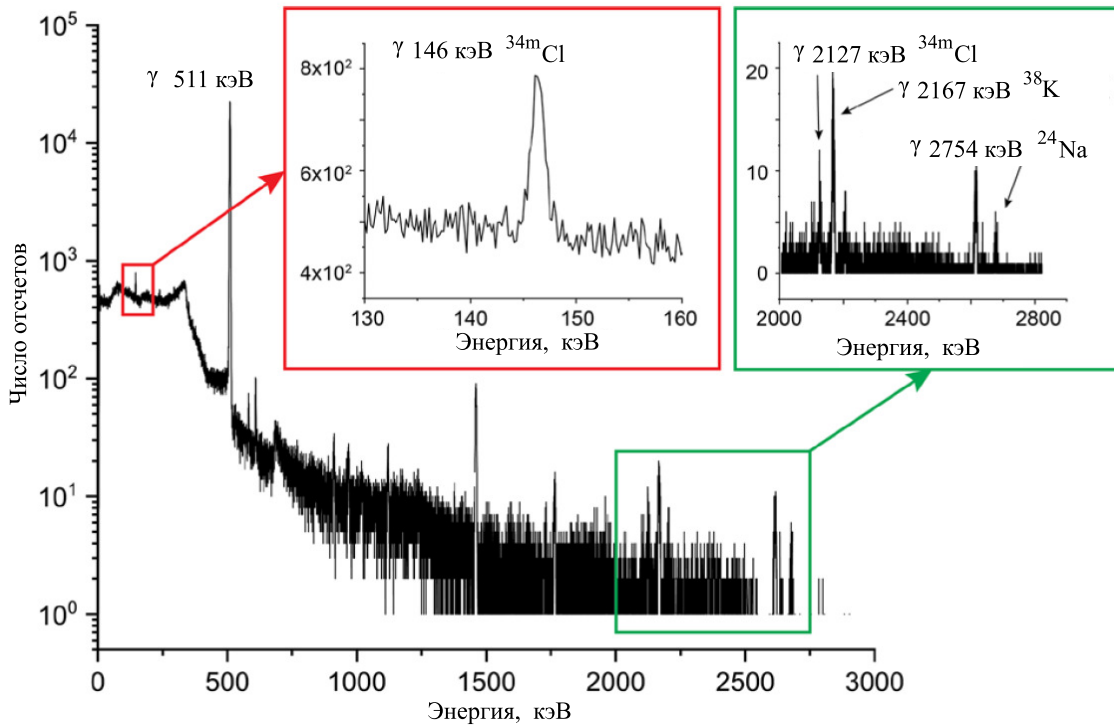


Рис. 2. Спектр облученного образца крови человека, измеренный с использованием полупроводникового HPGe спектрометра

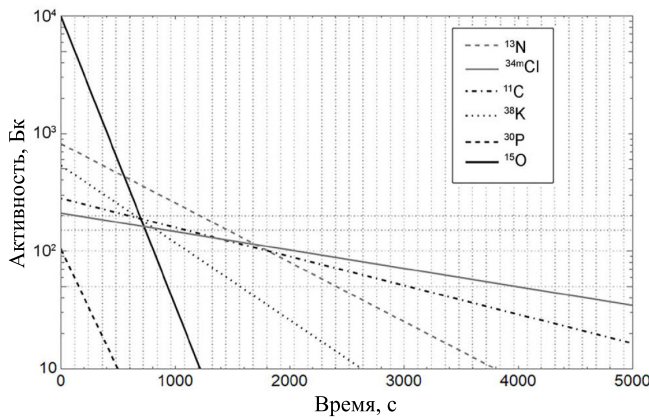


Рис. 3. Вклады активности каждого из изученных радионуклидов, в суммарную активность, зарегистрированную по гамма-линии 511 кэВ (в логарифмическом масштабе)

Средневзвешенный выход реакций  $^{16}\text{O}(\gamma, n)^{15}\text{O}$  и  $^{31}\text{P}(\gamma, n)^{30}\text{P}$  определялся аналогично по формуле (3) и из табличных данных [20, 21]. Далее, используя полученные данные о потоке, средневзвешенные выходы  $(\gamma, n)$ -реакций на кислороде и фосфоре и данные об их исходном содержании в крови человека по формуле (2) рассчитывались активности  $^{15}\text{O}$  и  $^{30}\text{P}$ . Полученные результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3. Содержание позитрон-излучающих нуклидов в крови человека после 11 мин облучения на линейном ускорителе Varian Trilogy с максимальной энергией пучка 20 МэВ

Радионуклид	Активность, Бк/мл крови
$^{11}\text{C}$	$1.2 \times 10^2$
$^{13}\text{N}$	$4.6 \times 10^2$
$^{15}\text{O}$	$3.1 \times 10^3$
$^{30}\text{P}$	42.1
$^{34m}\text{Cl}$	89.2
$^{38}\text{K}$	$2.9 \times 10^2$

## 2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Достоверность полученных результатов оценивалась по активностям  $^{34m}\text{Cl}$  и  $^{38}\text{K}$ , которые одновременно определялись и расчетным путем по аннигиляционному выходу, и прямыми измерениями гамма-переходов (рис. 2). Из прямых измерений была получена активность  $^{38}\text{K}$   $286 \pm 46$  Бк/мл, расчетная активность по аннигиляционному выходу оказалась равной  $A(^{38}\text{K}) = 334$  Бк/мл. Некоторое завышение расчетных результатов вероятнее всего связано с недоучетом поправки на мёртвое время. Эта поправка составляет 70% для  $^{15}\text{O}$ , и 15–20% для  $^{38}\text{K}$ . С учетом вышеизложенного погрешность результатов содержания позитрон-излучающих нуклидов, представленных в табл. 3, со-

ставляет 10–15%, за исключением  $^{34m}\text{Cl}$ , для которого погрешность измерений составляет 5%.

Таблица 4. Оценка вклада активности позитрон-излучающих радионуклидов в активацию крови для разных фракций облучения на линейном ускорителе электронов с энергией пучка 20 МэВ

Радионуклид	Активность, Бк/мл крови для времени облучения:	
	1 минута	3 минуты
$^{11}\text{C}$	13	37
$^{13}\text{N}$	58	$1.6 \times 10^2$
$^{15}\text{O}$	$9.0 \times 10^2$	$2.0 \times 10^3$
$^{30}\text{P}$	12	27
$^{34m}\text{Cl}$	9	26.5
$^{38}\text{K}$	40	$1.1 \times 10^2$

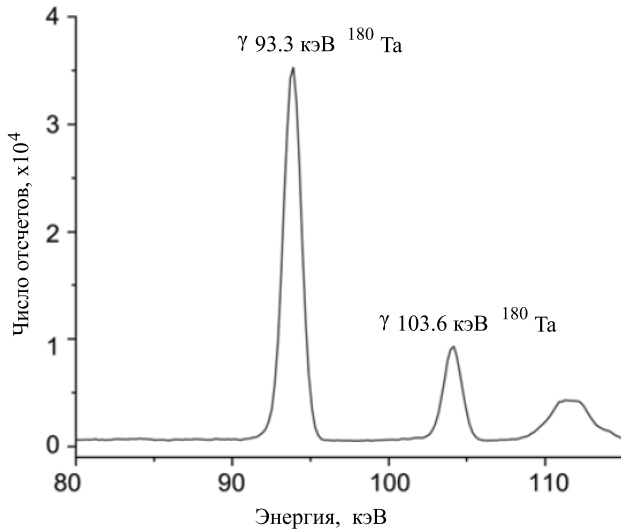


Рис. 4. Фрагмент спектра облученной мониторной мишени тантала, измеренный с использованием полупроводникового HPGe-спектрометра

Исходя из наших результатов можно предположить, что вклад в формирование поглощенной дозы от позитрон-излучающих нуклидов, активированных в крови человека, будет происходить в основном за счет трех нуклидов —  $^{15}\text{O}$ ,  $^{34m}\text{Cl}$  и  $^{38}\text{K}$ . Несмотря на то, что активности  $^{34m}\text{Cl}$  и  $^{38}\text{K}$  значительно меньше активности  $^{15}\text{O}$ , из-за большой граничной энергии позитронов (почти в два раза больше, чем у кислорода), более длительного периода полураспада и наличия высокоэнергетических гамма-квантов их вклад в общую дозу может быть соизмерим. Однако вклад  $^{15}\text{O}$  в поглощенную дозу от позитрон-излучающих радионуклидов будет преобладать во время 3-минутного облучения (табл. 4). Также стоит отметить, что венозная кровь обеднена кислородом, из чего можно сделать вывод, что артериальная кровь будет обладать еще большей

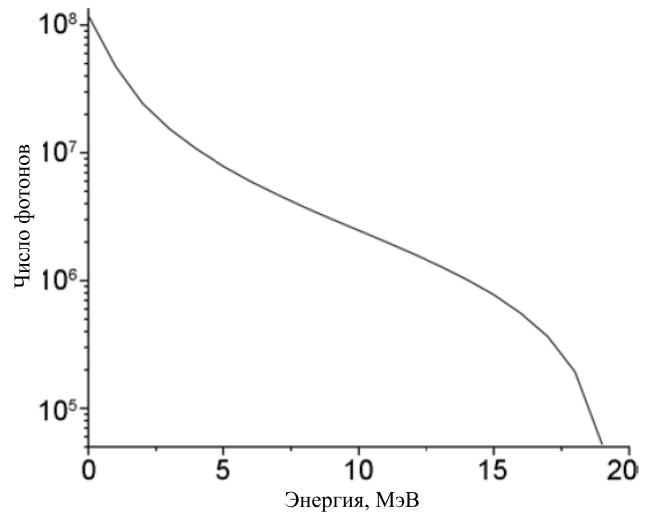


Рис. 5. Спектр тормозного излучения линейного медицинского ускорителя Varian Trilogy с максимальной энергией пучка 20 МэВ, смоделированный с использованием программного кода Geant4

активностью.

В работе [9] у шести пациентов после лучевой терапии на ускорителе 42 МэВ авторами с помощью ПЭТ через 45 мин после окончания облучения установлена позитронная активность только  $^{11}\text{C}$  и  $^{13}\text{N}$ , тогда как в наших исследованиях, кроме этих радионуклидов, надежно зафиксирована активность  $^{34m}\text{Cl}$  и  $^{38}\text{K}$  по гамма-переходам с энергиями 146 кэВ и 2167 кэВ. Причем вклад в суммарную активность  $^{38}\text{K}$  сравним с активностью  $^{13}\text{N}$ .

Отдельное внимание хотелось бы уделить активности  $^{24}\text{Na}$ . Как обсуждалось в наших предыдущих работах [5], при работе линейного медицинского ускорителя с максимальной энергией пучка 20 МэВ на материалах коллиматоров в  $(\gamma, n)$ -реакции образуются вторичные нейтроны со средней энергией  $\sim 0.89$  МэВ. В свою очередь, в результате захвата этих нейтронов в реакции  $(n, \gamma)$  на натрия в составе NaCl, содержащимся в крови человека, образуется  $^{24}\text{Na}$  с периодом полураспада 15 ч (рис. 2), который распадается электронами с граничной энергией 1.37 МэВ и гамма-квантами с энергией 2.75 МэВ. Эта же активность образуется и в  $(\gamma, p)$ -реакции на  $^{25}\text{Mg}$ , также присутствующем в крови человека. Активность  $^{24}\text{Na}$  по результатам наших экспериментов после 11 мин облучения составляет 2.7 Бк/мл крови. Несмотря на небольшой вклад  $^{24}\text{Na}$  в суммарную активность облученных образцов крови человека, но с учетом значительного периода полураспада и высокой энергии гамма-квантов и электронов, его вклад в дополнительную дозу также может быть ощутимым.

Полученные результаты демонстрируют заметную активацию позитрон-излучающих нуклидов в крови пациента в процессе высокоэнергетической лучевой терапии. С учетом общего объема крови в теле человека  $\sim 5$  л и полного времени

кругооборота крови по большому и малому кругам кровообращения, которое в норме составляет ~21–26 с [10], за один сеанс лучевой терапии происходит многократное облучение критических органов человека активностью не только самого короткоживущего из перечисленных изотопов ( $^{15}\text{O}$ ), но и другими радионуклидами с более длительным периодом полураспада.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена серия экспериментов по исследованию активации некоторых химических элементов в венозной крови взрослого человека при проведении лучевой терапии с использованием линейного ме-

дицинского ускорителя электронов с энергией пучка 20 МэВ. Впервые получены экспериментальные данные об активности позитрон-излучающих радионуклидов  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{30}\text{P}$ ,  $^{34m}\text{Cl}$ , и  $^{38}\text{K}$  в крови человека. Исходя из полученных результатов был сделан вывод, что наибольший вклад в формирование дозы внутреннего облучения от позитрон-излучающих радионуклидов вносят  $^{15}\text{O}$ ,  $^{34m}\text{Cl}$  и  $^{38}\text{K}$ . Полученные данные будут использованы для расчета поглощенной дозы от позитронного излучения, которую облученная кровь доставляет непосредственно в критические органы пациента.

Работа выполнена при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

- [1] *Spurný F., Johansson L., Sötherberg A. et al. // Physics in Medicine and Biology. 41, N 12. 2643. (1996).*
- [2] *Agosteo S., Para A.F., Gerardi F. et al. // Physics in Medicine and Biology. 38, N 10. 1509. (1993).*
- [3] *Nath R., Epp E.R., Laughlin J.S. et al. // Medical Physics. 11, N 3. 231. (1984).*
- [4] *Ing H., Nelson W.R., Shore R.A. // Medical Physics. 9, N 1. 27. (1982).*
- [5] *Gantsovsky P.P. et al. // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 84, N 11. 1330. (2020).*
- [6] *Farhood B., Ghorbani M., Goushbolagh N. Abdi et al. // Health Physics. 118, N 1. 65. (2020).*
- [7] *Howell R.M., Kry S.F., Burgett E. et al. // Medical Physics. 36, N 9(1). 40278. (2009).*
- [8] *Gudowska I., Brahme A., Andreo P. et al. // Physics in Medicine and Biology. 44, N 9. 2099. (1999).*
- [9] *Липунова Е.А., Скоркина М.Ю. Физиология крови. Белгород: Белгородский государственный университет, 2007.*
- [10] *Willems J.L., Roelandt J.R., Van de Vel H.R., Joossens J.V. // The American Journal of Cardiology. 27, N 2. 155. (1971).*
- [11] ICRU. Photon, electron, proton and neutron interaction data for body tissues. ICRU Report 46. Bethesda, MD, 1992.
- [12] ICRU. Tissue Substitutes in Radiation Dosimetry and Measurement. ICRU Report 44. Bethesda, MD, 1989.
- [13] *Janek S., Svensson R., Jonsson C., Brahme A. // Physics in Medicine and Biology. 51, N 22. 5769. (2006).*
- [14] *Varlamov A.V., Varlamov V.V., Rudenko D.S., Stepanov M.E. Atlas of Giant Dipole Resonances. Vienna: IAEA Nuclear Data Section, 1999.*
- [15] Table of Isotopes. The 8th edition / ed. Firestone R.B. et al. Hungary: Springer, 1997.
- [16] *Zheltonozhskaya M.V., Zheltonozhsky V.A., Lykova E.N. et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 470. 38. (2020).*
- [17] *Agostinelli S. et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 506, N 3. 250. (2003).*
- [18] *Zheltonozhsky V.A., Savrasov A.M. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 456. 116. (2019).*
- [19] *Iyengar G.V., Kollmer W.E., Bowen H.J.M. The elemental composition of human tissues and body fluids: a compilation of values for adults. New York: Verlag Chemie Weinheim, 1978.*
- [20] *Mutsuro N., Kageyama K., Mishina M. et al. // Journal of the Physical Society of Japan. 17, N 10. 1673. (1962).*
- [21] *Fuller E.G. // Phys. Rep. 127, N 3. 185. (1985).*

## Study of light nuclei activation in human blood during high-energy linear accelerator (Linac) radiation therapy

M.V. Zheltonozhskaya<sup>1,a</sup>, P.D. Remizov<sup>1</sup>, M.V. Lenivkin<sup>1</sup>, E.N. Lykova<sup>1</sup>, A.P. Chernyaev<sup>1</sup>, V.N. Iatsenko<sup>2</sup>, O.V. Iatsenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

<sup>2</sup> Burnazyan Federal Medical Biophysical Center. Moscow 123098, Russia

E-mail: <sup>a</sup>mv.zhelton@physics.msu.ru

A series of experiments have been performed to study the activation of chemical macronutrients in human venous blood throughout radiation treatment with the 20 MeV linac. Some elements in the human blood can be activated as positron-emitting radionuclides by ( $\gamma$ ,  $n$ )-reaction. We calculated the  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{30}\text{P}$ ,  $^{34m}\text{Cl}$ , and  $^{38}\text{K}$  activities in irradiated human venous blood samples for the first time. As a result, we

concluded that the main contribution to the dose from positron-emitting nuclides activated in human blood provides three nuclides:  $^{15}\text{O}$ ,  $^{34m}\text{Cl}$ , and  $^{38}\text{K}$ .

PACS: 89.90.+n, 24.30.Cz.

*Keywords:* radiation treatment, medical linear accelerator, 20 MeV linac, bremsstrahlung, photonuclear reactions, human blood, activation, positron-emitting radionuclides.

*Received 26 August 2022.*

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2023. **78**, No. 4. Pp. 557-563.

#### Сведения об авторах

1. Желтоножская Марина Викторовна — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: [zhelton@yandex.ru](mailto:zhelton@yandex.ru).
2. Ремизов Павел Дмитриевич — мл. науч. сотрудник; e-mail: [pd.remizov@physics.msu.ru](mailto:pd.remizov@physics.msu.ru).
3. Ленивкин Максим Вадимович — студент магистратуры;
4. Лыкова Екатерина Николаевна — канд. физ.-мат. наук, ассистент; e-mail: [iv-kate@yandex.ru](mailto:iv-kate@yandex.ru).
5. Черняев Александр Петрович — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой физики ускорителей и радиационной медицины; e-mail: [a.p.chernyaev@yandex.ru](mailto:a.p.chernyaev@yandex.ru).
6. Яценко Владимир Наумович — канд. техн. наук, зав. лабораторией радиометрических и спектроскопических исследований человека и окружающей среды; e-mail: [vlad-yatsenko@mail.ru](mailto:vlad-yatsenko@mail.ru).
7. Яценко Оксана Владимировна — канд. хим. наук, ст. науч. сотрудник.