

УДК 544.58: 661.12

DOI 10.52928/2070-1624-2022-38-4-69-80

**НАКОПЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В СМЕННЫХ ДЕТАЛЯХ  
И ВОДНОЙ МИШЕНИ ЦИКЛОТРОНА****А. Н. КИЙКО**

(Белорусский государственный институт метрологии, Минск);  
канд. физ.-мат. наук, доц. С. А. ВАБИЩЕВИЧ, Н. В. ВАБИЩЕВИЧ  
(Полоцкий государственный университет);  
канд. физ.-мат. наук Д. И. БРИНКЕВИЧ  
(Белорусский государственный университет, Минск)

Рассмотрено накопление нежелательных долгоживущих радионуклидов при производстве радиофармпрепаратов на основе  $^{18}\text{F}$  с использованием циклотрона ИВА Cyclone 18/9 НС. С помощью спектрометрии гамма-излучения высокого разрешения с детекторами HPGe проведена идентификация радионуклидов и оценка активности в активируемых компонентах (стриппер, входное окно мишени) «медицинского» 18-МэВ циклотрона ИВА Cyclone 18/9. В регенерированной воде идентифицированы более 20 нежелательных радионуклидов. Описаны различные механизмы попадания долгоживущих радионуклидов в облученную воду. Полученные результаты имеют важное значение для оптимизации методов обращения с радиоактивными отходами при производстве радиофармпрепаратов и, как следствие, минимизации дозовых нагрузок персонала.

**Ключевые слова:** радиофармпрепараты, радионуклиды, циклотрон, обогащенная  $^{18}\text{O}$  вода, протонное облучение.

**Введение.** В настоящее время коммерческие циклотроны, ускоряющие отрицательные ионы водорода и дейтерия в диапазоне энергий от 10 до 30 МэВ, широко используются для производства медицинских и промышленных изотопов [1]. Медицинские изотопы применяются в различных отраслях медицины (нейрологии, кардиологии, онкологии и т.д.) для диагностики ряда заболеваний, а также для терапии злокачественных новообразований [2]. Большинство изотопов, используемых в медицинской практике, нарабатывается путем бомбардировки жидких, газовых или твердых мишеней пучками ускоренных протонов. Чаще всего медицинские изотопы являются продуктами  $(p, n)$ ,  $(p, 2n)$  или  $(p, \alpha)$  реакций. В литературе такие циклотроны часто называют «медицинскими».

Ежегодно в мире выполняется 37–40 млн диагностических процедур ядерной медицины и 7,5 млн радиотерапевтических процедур, а спрос на радиоизотопы ежегодно увеличивается на 5%, что примерно соответствует общему приросту оборудования и исследований. Данный показатель существенно зависит от страны и в отдельных случаях может составлять 15–20% прироста в год и более. По оценке МАГАТЭ, в отделениях ядерной медицины во всем мире работает более 100 тыс. человек, при этом в последние годы наблюдается значительный рост количества исследований при относительно стабильном количестве персонала, что приводит к увеличению интенсивности труда и, как следствие, может приводить к увеличению лучевой нагрузки [3].

В медицинской диагностике обычно используются короткоживущие изотопы с периодом полураспада в несколько часов. Они должны быть использованы в течение небольшого промежутка времени после облучения мишени и получения радиофармпрепарата (РФП). Чтобы обеспечить цикл производства таких препаратов, циклотроны и лаборатории по производству размещаются на месте использования РФП – в больницах, центрах по распределению медицинских препаратов, диагностических центрах и т.п. Это обстоятельство обуславливает резкое ужесточение требований по радиационной безопасности и обращению с радиоактивными отходами.

Наиболее распространенными РФП, применяющимися при позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ), являются препараты на основе  $^{18}\text{F}$ , который образуется по реакции  $^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$  при бомбардировке водной мишени, обогащенной  $^{18}\text{O}$  (> 95%), протонами с энергией 9–18 МэВ. Образующиеся в этой реакции вторичные нейтроны активируют компоненты циклотрона, а также бетонные стены, создавая радиологические опасности во время периода обслуживания или вывода из эксплуатации циклотрона [4–7]. Помимо наработки целевого радионуклида  $^{18}\text{F}$ , в результате протонной и нейтронной активации мишени циклотрона происходит накопление в облучаемой воде [ $^{18}\text{O}$ ]H<sub>2</sub>O побочных радиоактивных продуктов с достаточно высокими уровнями активности. Состав и уровни активности побочных радионуклидов сильно зависят от конструктивных параметров используемого циклотрона и условий облучения [8; 9].

Побочные радионуклиды (ПРН) провоцируют целый ряд нежелательных последствий. С одной стороны, попадая с облученной водой непосредственно в реактор, они снижают выход РФП [10–15]. С другой стороны, накопление ПРН в расходных материалах радиохимического синтеза (флаконы с регенерированной

водой [ $^{18}\text{O}$ ] $\text{H}_2\text{O}$ , одноразовые кассеты, картриджи твердофазной экстракции и стерилизующие фильтры), а также в незаменимых элементах модуля синтеза, существенно увеличивает дозовые нагрузки на радиохимический персонал при выполнении ежедневного обслуживания, дезинфекционной обработки и подготовки горячих камер к производству. Так, мощности эквивалентной дозы (МЭД) на расстоянии 10 см от флакона с регенерированной водой [ $^{18}\text{O}$ ] $\text{H}_2\text{O}$  (объемом до 10 мл) после трех дней выдержки по мере активации мишени возрастали с 5 до 250 мкЗв/ч. При этом внутри горячей камеры с установленными в ней модулями Synthera (IBA, Бельгия) МЭД через сутки после синтеза превышала 80 мкЗв/ч и мало изменялась после поверхностной дезактивации оборудования [13].

Кроме того, загрязнение расходных материалов радиохимического синтеза ПРН приводит к увеличению номенклатуры и объемов жидких и твердых радиоактивных отходов (РАО), требующих выдержки до достижения необходимых МЗА в течение нескольких лет [8; 9; 12], и, соответственно, обуславливает увеличение дозовых нагрузок для персонала, ответственного за дозиметрию, учет и контроль РАО. При интенсивном ежедневном производстве РФП (до 3 синтезов в день) в ПЭТ-центре накапливается большое количество жидких радиоактивных отходов (ЖРО), которые в основном представляют собой регенерированную воду [ $^{18}\text{O}$ ] $\text{H}_2\text{O}$  и, в меньшей степени, растворы для дезактивации оборудования [14].

Одна из наиболее важных проблем использования (и вывода из эксплуатации) «медицинских» циклотронов связана с высокой активностью, индуцированной в компонентах циклотрона, в частности в теле мишени. Перечень радионуклидов, образующихся в различных частях циклотрона, в основном определяется взаимодействием с его частями протонного пучка или вторичных нейтронов, образующихся в мишени [6–12; 15]. Эта проблема актуальна в связи с необходимостью радиационной защиты операторов при техническом обслуживании циклотрона с заменой его компонентов (стриппера, деталей мишени и т.д.), которое приходится проводить не реже 1–2 раз в год. До радиоактивного распада извлеченные компоненты обычно хранятся в свинцовом контейнере. Перед закладкой на хранение необходимо знание величин остаточной активности наиболее важных радионуклидов, присутствующих в извлеченном компоненте. Это также необходимо для оценки степени облучения персонала при техническом обслуживании.

В настоящее время в мире работают более двух тысяч циклотронов. Основным предназначением более 70% из них является производство медицинских радионуклидов [5]. Интерес к исследованию накопления нежелательных радионуклидов при работе «медицинских» циклотронов и производстве РФП резко возрос в последние десятилетия [9; 10; 15–21]. Активность и состав радионуклидов в облученной воде определяются условиями конкретного производства (тип циклотрона, материал входного окна и тела мишени, интенсивность и длительность облучения и т.д.) и могут варьировать в широких пределах. В последние годы были выполнены исследования накопления радионуклидов на различных «медицинских» циклотронах (GE PET trace, Siemens ECLIPSE RDS-11, CYPRIS HM18, CYPRIS MINI trace и TR 19/9) с разными типами мишеней (серебряными, титановыми и танталовыми) [9–11; 15; 20; 22–27]. Эти исследования обычно проводятся перед запуском ПЭТ-центров или на начальном этапе их работы. Влияние длительного интенсивного рабочего цикла на накопление ПРН ранее не исследовалось. Кроме того, ощущается недостаток информации по циклотрону Cyclone 18/9 HC.

Идентификацию  $\gamma$ -излучающих радионуклидов и определение их активности выполняли с использованием спектрометра на особо чистом германии: детекторная система GEM40-83/DSPEC jr 2.0; энергетический диапазон 14,5–2911,4 кэВ; разрешение 0,182 кэВ/канал. Идентификацию ПРН проводили посредством соотнесения энергий  $\gamma$ -квантов, определенных экспериментально, со справочными значениями. Из-за высокой активности образцов измерения проводили не менее, чем через двое суток после последнего облучения на калибраторе активности Isomed 2010 (MED Nuklear – Medizintechnik Dresden Gmb, Германия).

Контроль содержания  $\beta$ -излучающих радионуклидов проводился с использованием автоматического жидкостного сцинтилляционного спектрометра с TDCR регистрацией HIDEX 300 SL и гамма-бета-спектрометра MKC-AT1315. Для HIDEX 300 SL энергетический диапазон составил 0–2 МэВ по  $\beta$ -частицам, интервал – 0,182 кэВ/канал, эффективность – более 26% (для трития), более 95% (для  $^{14}\text{C}$ ). Средний фон для  $\beta$ -частиц – 9 имп/мин. Для MKC-AT1315 диапазон энергий бета-излучения – 0,15–3,5 МэВ. Средний фон для  $\beta$ -частиц – 270 имп/мин, чувствительность для  $^{90}\text{Sr}$  в геометрии 0,03 л –  $3,5 \cdot 10^{-3}$  имп·л/(с·Бк). Использован жидкий сцинтиллятор на основе толуола. Пробы объемом 1 мл разводились в 10 мл жидкого сцинтиллятора. Время измерения  $\beta$ -спектра – 1000 с.

**Накопление радионуклидов в сменных деталях циклотрона.** В этом разделе приведены экспериментальные данные по оценке активности и идентификации радионуклидов в активированных компонентах мишени (входные окна мишени из фольги Navar и титановой фольги) и стриппера (вилки съёмника и углеродная фольга) «медицинского» 18-Мэв циклотрона IBA Cyclone 18/9, находящихся на пути протонного пучка и обычно заменяемых каждые полгода, а по мере необходимости и чаще. Исследование проводилось с помощью спектрометрии гамма-излучения высокого разрешения с детекторами HPGe. Основные мишенные компоненты обычно заменяются (за исключением сбоев или аномалий) после ~200 ч облучения. Так, типична замена входного окна мишени из сплава Navar при интегрированном мишенном токе

~2000 мкА·ч [22]. Замененные детали должны храниться в свинцовом контейнере толщиной не менее 5 см, потому что уровень возникающей дозы примерно в 100 раз превышает мощность дозы амбиентного фона.

Стриппер в циклотронах медицинского назначения представляет собой тонкую пленку пиролитического графита, использующуюся в устройствах вывода протонного пучка. В них отрицательно заряженные ионы Н<sup>-</sup> теряют электроны и трансформируются в положительно заряженные протоны, вследствие чего направление отклонения ионного пучка в магнитном поле изменяется на противоположное и он может быть легко выведен на облучаемую мишень.

Стриппер облучался дозами до 5000 мкА·ч циклами длительностью по 100–120 мин при плотности ионного тока ~100 мкА·см<sup>-2</sup> со средним временным промежутком между циклами ~22 ч. Величина мощности дозы на расстоянии 10 см от стриппера через 2 дня после замены была около 50 мкЗв ч<sup>-1</sup>.

В γ-спектрах облученного стриппера через неделю после последнего облучения наблюдались линии радионуклидов (РН) никеля <sup>57</sup>Ni, кобальта <sup>55</sup>Co, <sup>56</sup>Co, <sup>57</sup>Co, <sup>58</sup>Co, марганца <sup>54</sup>Mn, хрома <sup>51</sup>Cr (таблица 1) и низкоактивного <sup>65</sup>Zn. Доминирующим радионуклидом является <sup>51</sup>Cr с периодом полураспада 27,7 суток. Указанные радионуклиды образуются в результате ядерных реакций с протонами стабильных изотопов железа (<sup>56</sup>Fe, <sup>57</sup>Fe, <sup>58</sup>Fe), хрома (<sup>52</sup>Cr, <sup>53</sup>Cr, <sup>54</sup>Cr) и никеля (<sup>58</sup>Ni) [28]. Это указывает на присутствие перечисленных изотопов в качестве примесей в пиролитическом графите либо на попадание этих элементов на поверхность стриппера в результате испарения из других деталей циклотрона. Радионуклидов, обусловленных взаимодействием протонов со стабильными изотопами углерода, не обнаружено. Вероятнее всего, это обусловлено короткими периодами полураспада (*t*<sub>1/2</sub> от десятков секунд до нескольких минут) указанных радионуклидов.

Отметим, что полученные нами методом спектрометрии данные хорошо коррелируют с данными [29]. Единственное исключение составляют более низкие, чем в нашем случае, значения активности <sup>51</sup>Cr и <sup>57</sup>Co, что может быть обусловлено отличием в условиях облучения (малая 2,2 мл мишень, средний ток 32 мкА в ~3 раза меньше нашего) и применением при измерении коллимационного устройства со свинцовой стенкой с целью сокращения мертвого времени.

Таблица 1. – Активности γ-излучающих радионуклидов в фольге стриппера

РН	<i>t</i> <sub>1/2</sub> , дней	Активность после 2 дней хранения, кБк	Активность после полугода хранения, кБк	Реакции образования
<sup>51</sup> Cr	27,7	23	1	<sup>52</sup> Cr (p,pn) <sup>51</sup> Cr
<sup>54</sup> Mn	312,3	1,2	–	<sup>53</sup> Cr (p,γ) <sup>54</sup> Mn <sup>52</sup> Cr (p,n) <sup>54</sup> Mn
<sup>55</sup> Co	0,73	1,5	–	<sup>54</sup> Fe (p,γ) <sup>55</sup> Co <sup>58</sup> Ni (p,d) <sup>55</sup> Co
<sup>56</sup> Co	77,7	8	–	<sup>56</sup> Fe (p,n) <sup>56</sup> Co <sup>57</sup> Fe (p,2n) <sup>56</sup> Co
<sup>57</sup> Co	271,8	3	3	<sup>56</sup> Fe (p,γ) <sup>57</sup> Co <sup>57</sup> Fe (p,n) <sup>57</sup> Co
<sup>58</sup> Co	70,9	2,8	–	<sup>57</sup> Fe (p,γ) <sup>58</sup> Co <sup>58</sup> Fe (p,n) <sup>58</sup> Co
<sup>57</sup> Ni	1,48	3,4	–	<sup>58</sup> Ni (p,pn) <sup>57</sup> Ni

После хранения в течение полугода величина мощности дозы на расстоянии 10 см от стриппера снижается до значений < 1 мкЗв ч<sup>-1</sup> и он может выведен из состава РАО. При этом в γ-спектрах наблюдались линии <sup>57</sup>Co, <sup>51</sup>Cr и <sup>65</sup>Zn с активностью, близкой к пределу детектирования.

**Входное окно мишени.** Непосредственно после облучения детали входного окна мишени (Navar-фольга и титановое окно) имеют высокую удельную активность, что приводит к большому мертвому времени измерения даже при очень больших использованных расстояниях от детектора. Так, по данным [29] при измерении активности деталей входного окна водной мишени 18 МэВ циклотрона Cyclone 18/9 НС значение мощности дозы, измеренное ионизационной камерой TOL/F на расстоянии 10 см от фольги Navar, составляло около 6 мЗв/ч примерно через 25 дней после последнего облучения (или 41 мкЗв/ч на расстоянии 1 м).

В таблице 2 приведены основные идентифицированные радионуклиды с оценкой активности после последнего облучения. Отметим, что наибольшую активность имела Navar-фольга. Причем наибольший вклад в активность вносят радионуклиды с периодом полураспада около 70 дней. Это означает, что через ~2 года (10 периодов полураспада), общая активность будет снижена до значений, близких к 1 мкЗв ч<sup>-1</sup> и может быть рассмотрен вопрос вывода указанных компонент мишени из состава РАО.

Таблица 2. – Активности  $\gamma$ -излучающих радионуклидов в Navar-фольге и титановом окне, скорректированные на момент окончания облучения [29]

РН	$t_{1/2}$ , дней	Navar-фольга, МБк	Титановое окно, кБк	Реакции образования
$^{51}\text{Cr}$	27,7	0,45	–	$^{52}\text{Cr}(\text{p,pn})^{51}\text{Cr}$
$^{54}\text{Mn}$	312,3	0,8	–	$^{53}\text{Cr}(\text{p},\gamma)^{54}\text{Mn}$ $^{52}\text{Cr}(\text{p,n})^{54}\text{Mn}$
$^{52}\text{Mn}$	5,591	29	–	$^{52}\text{Cr}(\text{p,n})^{52}\text{Mn}$
$^{56}\text{Co}$	77,7	24	0,031	$^{56}\text{Fe}(\text{p,n})^{56}\text{Co}$ $^{57}\text{Fe}(\text{p},2\text{n})^{56}\text{Co}$
$^{57}\text{Co}$	271,8	0,4	0,00064	$^{56}\text{Fe}(\text{p},\gamma)^{57}\text{Co}$ $^{57}\text{Fe}(\text{p,n})^{57}\text{Co}$
$^{58}\text{Co}$	70,9	65	–	$^{57}\text{Fe}(\text{p},\gamma)^{58}\text{Co}$ $^{58}\text{Fe}(\text{p,n})^{58}\text{Co}$
$^{46}\text{Sc}$	83,83	–	0,74	$^{46}\text{Ti}(\text{n,p})^{46}\text{Sc}$
$^{48}\text{V}$	15,976	–	30,2	$^{48}\text{Ti}(\text{p,n})^{48}\text{V}$ $^{49}\text{Ti}(\text{p},2\text{n})^{48}\text{V}$

В деталях входного окна серебряной водной мишени 9,6 МэВ циклотрона MINI trace были обнаружены следующие радионуклиды: в фольге Navar – изотопы кобальта  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ , марганца  $^{54}\text{Mn}$ , технеция  $^{95}\text{Tc}$ , кадмия  $^{109}\text{Cd}$  и рения  $^{183}\text{Re}$ ; в титановой фольге –  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{46}\text{Sc}$ ,  $^{48}\text{V}$ ,  $^{51}\text{Cr}$  и  $^{75}\text{Se}$  с более низкой активностью; а в уплотнении Helicoflex – только три РН  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$  и  $^{51}\text{Cr}$ . Эти результаты хорошо коррелируют с данными работы [29], приведенными выше.

**Накопление нежелательных  $\gamma$ -излучающих радионуклидов в водной мишени.** В таблице 3 представлены результаты наших исследований процессов накопления нежелательных радионуклидов, образующихся в воде  $^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ , обогащенной по кислороду  $^{18}\text{O}$  до 97%, и проведено их сравнение с имеющимися литературными данными. Исследования проводились в течении 3 лет интенсивной работы циклотрона Cyclone 18/9 НС. Использовали ниобиевую мишень Nirta Fluor объемом 3,2 мл с входным окном из сплава Navar толщиной 25 мкм. Время облучения мишени за один производственный цикл составляло 100–130 мин, ионный ток на мишени – 75–80  $\mu\text{A}$ . Мощность, выделяемая на мишени, при этих условиях облучения составляет ~1,45 кВт. Средняя интенсивность работы циклотрона составляла от 5 до 9 циклов облучения в неделю.

В облученной воде нами были идентифицированы более 20 нежелательных радионуклидов. В таблице 3 представлены возможные реакции их образования и основные ядерно-физические характеристики [8]. Существенное влияние на активность и набор радионуклидов в облученной воде оказывает ранее накопленная мишенью доза. Так, при накопленной на мишени дозе свыше 2000  $\mu\text{A}\cdot\text{ч}$  содержание РН в облученной воде возрастает на порядок и увеличивается набор детектируемых нежелательных радионуклидов [18], что обусловлено радиационно-индуцированной коррозией мишени [8; 30]. Содержание РН также зависело от режима, длительности и периодичности облучения мишени, содержания химических примесей в воде и ряда других факторов.

Таблица 3. – Основные характеристики идентифицированных нежелательных радионуклидов, образующихся при облучении на циклотроне Cyclone 18/9 водной ниобиевой мишени с входным окном из сплава Navar

РН	Возможная реакция получения и ее пороговая энергия	Тип и энергия излучения изотопа (кэВ)	Период полураспада, схема распада
1	2	3	4
$^{55}\text{Co}$	$^{58}\text{Ni}(\text{p},\alpha)^{55}\text{Co}$ ; 1,36 МэВ $^{54}\text{Fe}(\text{p},\gamma)^{55}\text{Co}$	$\gamma$ , 931,3; 477,2; 1408,4; 1316,4; 3253,41 $\beta^+$ (76 %); КЗ(24 %)	17,5 ч $^{55}\text{Co} \rightarrow ^{55}\text{Fe} \rightarrow ^{55}\text{Mn}$
$^{56}\text{Co}$	$^{56}\text{Fe}(\text{p,n})^{56}\text{Co}$ ; 5,44 МэВ $^{68}\text{Ni}(\text{p,t})^{56}\text{Co}$	$\gamma$ , 846,77; 1238,28; 2598,45; 1771,36; 3253,41 КЗ (81 %); $\beta^+$ (19 %)	77,27 сут $^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$
$^{57}\text{Co}$	$^{56}\text{Fe}(\text{p},\gamma)^{57}\text{Co}$ $^{57}\text{Fe}(\text{p,n})^{57}\text{Co}$ ; 1,65 МэВ $^{58}\text{Ni}(\text{p},2\text{p})^{57}\text{Co}$ $^{58}\text{Ni}(\text{n,d})^{57}\text{Co}$ ; 6,05 МэВ $^{58}\text{Ni}(\text{p},2\text{p})^{57}\text{Co}$ ; 8,31 МэВ $^{60}\text{Ni}(\text{p},\alpha)^{57}\text{Co}$ ; 0,27 МэВ	$\gamma$ , 122,06; 136,47; 14,41; 692,03 КЗ	271,8 сут $^{57}\text{Co} \rightarrow ^{57}\text{Fe}$
$^{58}\text{Co}$	$^{57}\text{Fe}(\text{p},\gamma)^{58}\text{Co}$ $^{58}\text{Fe}(\text{p,n})^{58}\text{Co}$ ; 3,14 МэВ $^{58}\text{Ni}(\text{n,p})^{58}\text{Co}$ ; 0 МэВ $^{60}\text{Ni}(\text{p,t})^{58}\text{Co}$ $^{59}\text{Co}(\text{n},2\text{n})^{58}\text{Co}$ $^{59}\text{Co}(\text{n,pn})^{58}\text{Co}$	$\gamma$ , 810,76; 863,96; 1674,73 КЗ $\beta^+$ (14,5 %)	70,92 сут $^{58}\text{Co} \rightarrow ^{58}\text{Fe}$

Окончание таблицы 3

1	2	3	4
<sup>51</sup> Cr	<sup>50</sup> Cr(n,γ) <sup>51</sup> Cr; 0 МэВ <sup>54</sup> Fe(n,α) <sup>51</sup> Cr <sup>52</sup> Cr(p,np) <sup>51</sup> Cr; 12,3 МэВ	γ, 320,08 КЗ	27,7 сут <sup>51</sup> Cr→ <sup>51</sup> V
<sup>52</sup> Mn	<sup>52</sup> Cr(p,n) <sup>52</sup> Mn; 5,6 МэВ <sup>54</sup> Fe(n,p2n) <sup>52</sup> Mn	γ, 744,23; 935,54; 1333,65; 1434,07 КЗ	5,59 сут <sup>52</sup> Mn→ <sup>52</sup> Cr
<sup>54</sup> Mn	<sup>53</sup> Cr(p,γ) <sup>54</sup> Mn <sup>54</sup> Cr(p, n) <sup>54</sup> Mn; 2,2 МэВ <sup>58</sup> Ni(n,α) <sup>54</sup> Mn; 6,42 МэВ	γ, 834,85 КЗ	312,3 сут <sup>54</sup> Mn→ <sup>54</sup> Cr
<sup>57</sup> Ni	<sup>58</sup> Ni(p,pn) <sup>57</sup> Ni; 10,17 МэВ <sup>58</sup> Ni(n,2n) <sup>57</sup> Ni; 12,41 МэВ	γ, 1757,5; 127,2; 1919,5; 1377,6 КЗ; β <sup>+</sup> (53 %)	35,6 ч <sup>57</sup> Ni→ <sup>57</sup> Co→ <sup>57</sup> Fe
<sup>7</sup> Be	<sup>7</sup> Li(p,n) <sup>7</sup> Be <sup>10</sup> B(p,α) <sup>7</sup> Be <sup>11</sup> B(p,nα) <sup>7</sup> Be	γ, 477,60 КЗ	53,29 сут <sup>7</sup> Be→ <sup>7</sup> Li
<sup>65</sup> Zn	<sup>65</sup> Cu(p,n) <sup>65</sup> Zn <sup>64</sup> Zn(n,γ) <sup>65</sup> Zn	γ, 1115,55 КЗ	244,3 сут <sup>65</sup> Zn→ <sup>65</sup> Cu
<sup>92m</sup> Nb	<sup>93</sup> Nb(n,2n) <sup>92m</sup> Nb; 8,9 МэВ <sup>93</sup> Nb(γ,n) <sup>92m</sup> Nb	γ, 934,46; 912,73; 1847,27 КЗ; β <sup>+</sup>	10,15 сут <sup>92m</sup> Nb→ <sup>92</sup> Zr
<sup>95</sup> Nb	<sup>98</sup> Mo(p,α) <sup>95</sup> Nb <sup>95</sup> Mo(n,p) <sup>95</sup> Nb	γ, 204,12; 561,67; 765,8 β <sup>-</sup>	34,98 сут <sup>95</sup> Nb→ <sup>95</sup> Mo
<sup>95m</sup> Nb	<sup>98</sup> Mo(p,α) <sup>95m</sup> Nb <sup>95</sup> Mo(n,p) <sup>95m</sup> Nb	γ, 204,12; 582,08; 786,2; 820,62 ИП (94,4 %) β <sup>-</sup> (5,6 %)	86,6 ч <sup>95m</sup> Nb→ <sup>95</sup> Mo
<sup>96</sup> Nb	<sup>96</sup> Mo(n,p) <sup>96</sup> Nb	γ, 778,2; 568,8; 459,88; 849,93 β <sup>-</sup>	23,35 ч <sup>96</sup> Nb→ <sup>96</sup> Mo
<sup>95</sup> Tc	<sup>94</sup> Mo(p,γ) <sup>95</sup> Tc; <sup>95</sup> Mo(p,n) <sup>95</sup> Tc; 2,5 МэВ <sup>96</sup> Mo(p,2n) <sup>95</sup> Tc	γ, 765,79; 947,67; 1073,7; 869,6 КЗ	20,0 ч <sup>95</sup> Tc→ <sup>95</sup> Mo
<sup>95m</sup> Tc	<sup>94</sup> Mo(p,γ) <sup>95m</sup> Tc; <sup>95</sup> Mo(p, n) <sup>95m</sup> Tc; 2,5 МэВ <sup>96</sup> Mo(p,2n) <sup>95</sup> Tc	γ, 204,12; 582,1; 786,2; 835,15; 1036,3 КЗ (96,1%), ИП (3,9 %)	61 сут <sup>95m</sup> Tc→ <sup>95</sup> Mo
<sup>96</sup> Tc	<sup>95</sup> Mo(p,γ) <sup>96</sup> Tc; <sup>96</sup> Mo(p,n) <sup>96</sup> Tc; 3,8 МэВ	γ, 778,22; 812,58; 849,93; 1126,97 КЗ	4,28 сут <sup>96</sup> Tc→ <sup>96</sup> Mo
<sup>181</sup> Re	<sup>182</sup> W(p,2n) <sup>181</sup> Re; 10,65 МэВ	γ, 365,6; 360,7; 639,3; 953,42 КЗ	19,9 ч <sup>181</sup> Re→ <sup>181</sup> W→ → <sup>181</sup> Ta
<sup>182</sup> Re	<sup>182</sup> W(p,n) <sup>182</sup> Re; 3,6 МэВ	γ, 1221,4; 229,3; 67,75; 1121,3 КЗ	64 ч <sup>182</sup> Re→ <sup>182</sup> W
<sup>183</sup> Re	<sup>182</sup> W(p,γ) <sup>183</sup> Re <sup>183</sup> W(p,n) <sup>183</sup> Re; 1,35 МэВ	γ, 46,48; 162,32; 291,72; 208,80 КЗ	70,0 сут <sup>183</sup> Re→ <sup>183</sup> W
<sup>184</sup> Re	<sup>183</sup> W(p,γ) <sup>184</sup> Re <sup>184</sup> W(p,n) <sup>184</sup> Re; 2,23 МэВ	γ, 111,21; 792,07; 894,76; 903,28 КЗ	38,0 сут <sup>184</sup> Re→ <sup>184</sup> W
<sup>184m</sup> Re	<sup>183</sup> W(p,γ) <sup>184m</sup> Re <sup>184</sup> W(p,n) <sup>184m</sup> Re; 2,23 МэВ	γ, 161,27; 216,55; 252,85; 920,93 КЗ (24,6 %) ИП (75,4 %)	169 сут <sup>184</sup> Re→ <sup>184</sup> W
<sup>182</sup> Ta	<sup>182</sup> W(n,p) <sup>182</sup> Ta	γ, 1189,05; 67,75; 1121,3; 1221,4 β <sup>-</sup>	114,4 сут <sup>182</sup> Ta→ <sup>182</sup> W
<sup>183</sup> Ta	<sup>183</sup> W(n,p) <sup>183</sup> Ta	γ, 107,93; 246,06; 353,99; 161,35 β <sup>-</sup>	5 сут <sup>183</sup> Ta→ <sup>183</sup> W

Доминирующими радионуклидами при облучении водной мишени циклотрона Cyclone 18/9 НС с ниобиевой мишенью и входным окном из сплава Navar являются изотопы кобальта (<sup>55</sup>Co, <sup>56</sup>Co, <sup>57</sup>Co, <sup>58</sup>Co), хрома (<sup>51</sup>Cr), марганца (<sup>52</sup>Mn, <sup>54</sup>Mn), никеля (<sup>57</sup>Ni) и бериллия (<sup>7</sup>Be). Радиоизотопы ниобия, технеция и рения имели значительно более низкие активности. Отметим, что другими исследователями при использовании циклотронов разных типов (GE PET trace [9; 10; 15; 23; 24,], CYPRIS NM18 [20], CYPRIS MINI trace [27; 31] и TR 19/9 [11; 22]) с входным окном из сплава Navar вне зависимости от материала мишени (серебра [9; 23; 24; 27; 31; 32], ниобия [10; 11], тантала [26] или титана [20]) присутствие радиоизотопов Co, Cr, Ni и Mn в облученной воде наблюдается практически всегда. Исключение составляет облучение на циклотроне CYPRIS MINI trace с энергией 9,6 МэВ. В этом случае в γ-спектрах отсутствует линия 320 кэВ, обусловленная радиоизотопом <sup>51</sup>Cr. Доминирующей реакцией образования этого изотопа во входном окне водяной мишени является <sup>52</sup>Cr(p, np)<sup>51</sup>Cr с пороговой энергией 12,3 МэВ, превышающей энергию протонов в циклотроне CYPRIS MINI trace. Реакции на нейтронах менее продуктивны. Так, сечение реакции <sup>54</sup>Fe(n,α)<sup>51</sup>Cr, протекающей на резонансных нейтронах, по данным [33] не превышает 2 мбарн. Реакция <sup>50</sup>Cr(n,γ)<sup>51</sup>Cr имеет достаточно высокое сечение реакции 15 барн, но она протекает на тепловых нейтронах.

Для ее протекания необходимо торможение нейтронов, поэтому вероятность ее протекания в мишени невелика. Кроме того, доля изотопа  $^{50}\text{Cr}$  в естественной смеси составляет 4,3%. Указанные обстоятельства и обуславливают отсутствие  $^{51}\text{Cr}$  в облученной воде CYPRIIS MINI trace.

Активность каждого из радионуклидов в регенерированной воде  $^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$  на момент окончания синтеза (таблица 4) варьирует в широких пределах – от единиц до сотен тысяч Бк – в зависимости от накопленной мишенью дозы, а также, в меньшей степени, от длительности облучения и тока на мишени. Активность РН  $^7\text{Be}$  определялась в основном партией  $^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$  воды и сроками ее хранения, а для одной партии линейно зависела от длительности облучения в производственном цикле. Для остальных РН активности определялись в основном накопленной мишенью дозой, причем минимальные значения активности этих РН, приведенные в таблице 4, характерны для «чистой» (предварительно не облучавшейся) мишени, а максимальные – для мишеней с накопленной дозой свыше 4000 мкА·ч.

Таблица 4. – Диапазон измеренных активностей долгоживущих ПРН в воде  $^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$  на момент окончания облучения

Радионуклид	Активность, кБк
$^7\text{Be}$	0,01 – 12
$^{51}\text{Cr}$	0,041 – 84
$^{52}\text{Mn}$	0,05 – 17
$^{54}\text{Mn}$	0,119 – 5,5
$^{55}\text{Co}$	15,3 – 92
$^{56}\text{Co}$	1,95 – 41,9
$^{57}\text{Co}$	1,08 – 19,7
$^{58}\text{Co}$	10,4 – 141
$^{57}\text{Ni}$	9,73 – 7,41
$^{92}\text{Nb} + ^{95}\text{Nb}$	0,03 – 0,20
$^{95}\text{Tc} + ^{96}\text{Tc}$	0,02 – 12,9
$^{183}\text{Re} + ^{184}\text{Re}$	0,05 – 0,61
$^{182}\text{Ta} + ^{183}\text{Ta}$	0 – 0,18

Радиоизотопы технеция, ниобия, рения и тантала, как правило, имеют активность на три порядка ниже, чем радионуклиды кобальта, хрома и марганца. Так, суммарная активность нуклидов Nb, Tc, Re не превышает 1–5% от суммарной активности радиоизотопов кобальта. В ряде экспериментов активность указанных радионуклидов была ниже предела обнаружения (~5–10 Бк) использованной методики  $\gamma$ -спектрометрии. Тем не менее, присутствие именно радиоизотопов технеция, ниобия, рения наблюдалось в готовой лекарственной форме РФП  $^{18}\text{F}]\text{ФДГ}$  и  $^{18}\text{F}]\text{NaF}$  [18; 21; 34], причем их активность резко возрастала при облучении мишеней с накопленной дозой свыше 2500–3000 мкА·ч [18].

Основным механизмом попадания РН в облучаемую воду  $^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$  является вымывание продуктов активации из окна мишени. Отметим, что вымывание происходит в жестких химических условиях при облучении: постоянное точечное воздействие высокоэнергетического (18 МэВ) протонного пучка, рабочее давление ~25–30 атм., разогрев мишени до температур свыше 220 °С. Сплав Havar содержит ряд хорошо активирующихся элементов: кобальт (42%), хром (19,5%), железо (18,1%), никель (13,7%), вольфрам (2,7%), молибден (2,2%), марганец (1,6%) и углерод (0,2%)<sup>1</sup>. Все указанные выше элементы в составе фольги (кроме углерода) являются эффективными источниками РН. Как отмечалось в [29], радиоизотопы  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$  и  $^{54}\text{Mn}$  обнаруживаются в облученной Havar-фольге даже через 400 дней после последнего облучения. Большинство из нежелательных РН образуются в Havar-окне в результате реакций на протонах и, в меньшей степени, на нейтронах. Сравнение расчетных и экспериментальных данных [15; 35] показывает, что вследствие коррозии/эрозии из входного окна мишени в облучаемую воду вымываются от 10<sup>-2</sup> до 10<sup>-5</sup>% изотопов  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{52}\text{Mn}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  и  $^{57}\text{Ni}$ .

Следует отметить, что циклотронные мишени для производства медицинских радионуклидов страдают от двух основных проблем: коррозии из-за облученной протонами воды и охрупчивания жидкими металлами. Материал входного окна мишени должен отвечать следующим требованиям: обрабатываемость или простота конструкции, высокая температура плавления, высокие характеристики теплообмена, отличная химическая инертность, высокая прочность, позволяющая выдерживать давление свыше 30 атм. и т.д. [30].

<sup>1</sup> Havar. Technical Data Sheet [Electronic resource], Hamilton Precision Metals, Lancaster, PA. URL: <https://www.hpmetals.com/-/media/ametehpmetals/files/technical-data/ni-base-corrosion-resistant/havar.pdf>.

Соответствуя в наибольшей степени всем этим условиям, сплав  $\text{Navar}$  является основным материалом для изготовления входных окон водных мишеней циклотронов, несмотря на то, что представляет собой, как отмечено выше, основной источник нежелательных ПРН в облученной воде. В настоящее время ведутся работы по созданию входных окон из  $\text{Navar}$ -пленок, защищенных химически стойкими антикоррозионными покрытиями на основе  $\text{Nb}$ , нанесенными магнетронным напылением [11; 22; 30]. Это позволяет снизить содержание ПРН в облученной воде: примеси  $\text{Co}$  – в 25 раз,  $\text{Ni}$  и  $\text{Mn}$  – на порядок,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Fe}$  и  $\text{Mo}$  – в 2 раза [11].

Как отмечалось выше, при возрастании накопленной мишенью дозы  $> 2000 \mu\text{A}\cdot\text{ч}$  концентрация в облученной воде нежелательных ПРН возрастает почти на порядок. Это может быть объяснено следующими обстоятельствами. С ростом накопленной дозы входное окно мишени аморфизуется. Наиболее интенсивно этот процесс протекает на границах зерен. Аморфные участки в процессе облучения расплываются быстрее [36], что способствует усилению коррозии мишени. Действие обоих указанных факторов приводят к возрастанию концентрации нежелательных ПРН в облученной воде  $[\text{}^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ .

Ниобиевая мишень является источником только одного радионуклида  $^{92\text{m}}\text{Nb}$ , активность которого невелика (обычно не превышает 100 Бк). Он преимущественно образуется в результате реакции  $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$  с пороговой энергией 8,9 МэВ и довольно высоким сечением реакции  $\sim 1,4$  барн в диапазоне энергий нейтронов 12–18 МэВ. Возможно также протекание фотоядерной реакции  $^{93}\text{Nb}(\gamma,n)^{92\text{m}}\text{Nb}$  [37]. Не следует исключать и образование долгоживущих радионуклидов (ДРН)  $^{182,183}\text{Ta}$  и  $^{95,96}\text{Nb}$  из примесей вольфрама и молибдена в ниобиевой мишени по (n,p) реакции. Однако для изготовления мишеней используется ниобий очень высокой чистоты (свыше 99% [21]), поэтому такой механизм образования радионуклидов тантала и ниобия маловероятен. Следует отметить, что при использовании входного окна из ниобия на ниобиевой мишени [21] основными ДРН в облученной воде являются  $^{93\text{m}}\text{Mo}$  и  $^{92\text{m}}\text{Nb}$ . Эти же радионуклиды наблюдались и при облучении входного окна из сплава  $\text{Navar}$  с пленкой  $\text{Nb}$  толщиной 188 нм, нанесенной магнетронным напылением [22], причем наиболее активный из них  $^{93\text{m}}\text{Mo}$  (период полураспада  $t_{1/2} = 6,85$  часа) нарабатывался во входном окне по реакции  $^{93}\text{Nb}(p,n)^{93\text{m}}\text{Mo}$  с участием протонов и, следовательно, в наших экспериментах не наблюдался.

Заметим, что с точки зрения накопления ПРН ниобиевая мишень является наиболее приемлемой. Активность образующегося при ее облучении радионуклида  $^{92\text{m}}\text{Nb}$  пренебрежимо мала (ниже на 3–4 порядка) по сравнению с активностью ПРН, обусловленных активацией входного окна мишени из сплава  $\text{Navar}$  (см. таблицу 4). Для мишеней из других материалов ситуация хуже. Так, для наиболее часто применяемых серебряных мишеней основными ПРН являются  $^{109}\text{Cd}$  и  $^{110}\text{Ag}$ , образующиеся по реакциям  $^{109}\text{Ag}(p,n)^{109}\text{Cd}$  и  $^{109}\text{Ag}(n,\gamma)^{110}\text{Ag}$ . Причем их активность часто превышает суммарную активность от ДРН, образующихся в  $\text{Navar}$ -окне [9; 15; 27]. В титановой мишени образуются  $^{48}\text{V}$  (возможные реакции  $^{48}\text{Ti}(p,n)^{48}\text{V}$  и  $^{49}\text{Ti}(p,2n)^{48}\text{V}$ ) и  $^{46}\text{Sc}$  по реакции  $^{46}\text{Ti}(n,p)^{46}\text{Sc}$ , причем удельная активность в воде радионуклида  $^{48}\text{V}$  превышает 1 кБк/г и немногом уступает активности доминирующего  $^{51}\text{Cr}$  [20].

Особняком среди всех ПРН стоит  $^7\text{Be}$ . Он наблюдался в качестве одного из основных в облученной воде многими исследователями на разных мишенях (ниобиевой, серебряной, титановой) с различными входными окнами ( $\text{Navar}$  и ниобий) [10; 21; 27; 38]. Однако механизм его формирования не определен, причем в большинстве работ он вообще не обсуждается. Мы наблюдали сильную зависимость активности  $^7\text{Be}$  от используемой партии воды – она изменялась при смене флакона с водой  $[\text{}^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ . Кроме того, нами была установлена жесткая корреляция активности указанного ПРН с длительностью облучения. Полученные экспериментальные данные позволяют однозначно утверждать, что рассматриваемый изотоп образуется в процессе активации примесей бора и, вероятно, лития, содержащихся в  $[\text{}^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ , под действием высокоэнергетических протонов. Так, согласно сертификату качества производителя, обогащенная вода содержит бор в концентрации до 0,00011 мг/л, а  $\text{Li}$  – до 0,000065 мг/л. Кроме того, концентрации бора и щелочных металлов могут увеличиваться при длительном хранении воды во флаконах из боросиликатного стекла. По нашему мнению, именно активация указанных примесей в  $[\text{}^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$  воде по реакциям  $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$  и  $^{10}\text{B}(p,\alpha)^7\text{Be}$  является источником образования  $^7\text{Be}$ . Аналогичного мнения придерживаются и авторы [10], полагающие, что источником радионуклида  $^7\text{Be}$  является примесь бора в облучаемой  $[\text{}^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$  воде.

Схожее поведение было характерно и для радионуклида  $^{65}\text{Zn}$  [39]. Его активность также не зависела от набранной мишенью дозы и изменялась лишь при смене флакона с водой  $[\text{}^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ , поэтому мы полагаем, что и его предшественником являются стабильные изотопы в составе воды. В частности,  $^{65}\text{Zn}$  может образовываться при активации изотопов меди или цинка, которые присутствуют в  $[\text{}^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$  и могут попадать в нее, например, из теплообменного оборудования в процессе обогащения и/или в процессе нормализации по тритию.

Полученные нами экспериментальные данные по осаждению ПРН на анионно-обменном картридже [8; 13] свидетельствуют о том, что в условиях наработки  $[\text{}^{18}\text{F}]$ фторида происходит образование не только истинного раствора, содержащего ионы примесных ПРН, но и коллоидно-дисперсной фазы. По нашим данным до 30% кобальта и марганца, а также  $\sim 7\%$  хрома находятся в составе твердых частиц размерами  $> 5$  мкм, вымытых из входной фольги мишени циклотрона, причем доля коллоидно-дисперсной фазы увеличивается с ростом накопленной мишенью дозы. В то же время бериллий находился в основном в виде

истинного раствора и механическими фильтрами не задерживался. Аналогичное поведение характерно и для РН ниобия и технеция, которые являются основными радионуклидными примесями в радиофармпрепаратах на основе  $^{18}\text{F}$  при облучении мишеней с большой накопленной дозой ( $> 4000$  мкА·ч).

Подтверждением наличия дисперсной фазы в облученной воде  $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$  являются результаты, опубликованные в [23]. В этой работе приведены данные по осаждению ДРН на мишенных РАТ-фильтрах с порами диаметром 10 мкм. По данным [23] на мишенных РАТ-фильтрах осаждалось ~7% от суммарной активности ДРН, однако поведение конкретных радионуклидов сильно отличалось. Так, на механическом фильтре осаждалось ~25% радионуклидов кобальта, до 11–15% марганца и хрома, а радиоизотопы Тс и Ре практически не осаждались (до 1–3%). Это хорошо согласуется с полученными нами данными.

Основной источник накопления нежелательных РН в облученной воде – это входное окно мишени из сплава Navar, который представляет собой поликристалл с размерами кристаллитов от 10 мкм и выше. Кристаллиты состоят в основном из атомов кобальта, хрома, железа и никеля, которые являются источниками радионуклидов  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{52}\text{Mn}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  и  $^{57}\text{Ni}$  (см. таблицу 3). Вольфрам и молибден, являющиеся источником РН технеция, ниобия, тантала и рения (см. таблицу 3), преимущественно входят в состав межкристаллитной аморфной фазы. Одним из наиболее вероятных механизмов образования частиц с размером более 5 мкм является межкристаллитная коррозия фольги Navar – преимущественное вымывание металла из аморфной фазы между более стойкими к коррозии кристаллитами. Этот процесс, хорошо известный в атомной энергетике для аустенитных сталей [40], может протекать в жестких условиях производства  $^{18}\text{F}$  – при бомбардировке фольги протонами с энергией 18 МэВ и ее контакте с водой при температуре свыше 220 °С и давлении ~30 атм. При облучении высокоэнергетичными ионами поликристаллической мишени (в нашем случае входного окна из сплава Navar) наблюдается также преимущественное испарение аморфной межкристаллитной фазы [36]. В результате этого, а также ускоренного вымывания аморфной фазы, связи между отдельными кристаллитами на поверхности фольги ослабевают, вследствие чего кристаллиты могут вымываться как единое целое. Взвешенными дисперсными частицами в таком случае будут выступать микрокристаллиты из сплава Navar, содержащие в себе продукты активации материала окна мишени (преимущественно  $^{51}\text{Cr}$ ,  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{58}\text{Co}$ ,  $^{52}\text{Mn}$ ,  $^{54}\text{Mn}$  и  $^{57}\text{Ni}$ ). РН ниобия и технеция попадают в воду из аморфной фазы, поэтому не входят в состав коллоидно-дисперсной фазы и не задерживаются механическими фильтрами. Радионуклид  $^7\text{Be}$ , как отмечалось выше, образуется в процессе активации примесей бора и лития, содержащихся в  $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ . По этой причине в облученной воде он находится в виде истинного раствора и механическими фильтрами не задерживается.

Нельзя также исключить и возможности образования дисперсной фазы с включениями РН в результате окислительно-восстановительных процессов вследствие реакции материала мишени с радикальными продуктами радиолиза воды. При радиолизе воды с равными выходами образуются как ОН-радикалы, активно окисляющие поверхность металлов, так и сольватированные электроны, восстанавливающие ионы металлов в растворе вплоть до степени окисления 0. Образовавшиеся в ходе высокотемпературного радиолиза отдельные свободные атомы металлов при этом способны агрегировать в коллоиды, размеры которых могут достигать нескольких микрон.

**Заключение.** Проанализированные в настоящей работе процессы и механизмы попадания нежелательных долгоживущих радионуклидов имеют важное значение для оптимизации методов обращения с радиоактивными отходами при производстве радиофармпрепаратов и, как следствие, минимизации дозовых нагрузок персонала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Папаш, А. И. Коммерческие циклотроны / А. И. Папаш, Ю. Г. Аленицкий. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2008. – Т. 39, Вып 4. – Ч. 1 : Коммерческие циклотроны в диапазоне энергий от 10 до 30 МэВ для производства изотопов. – С. 1150–1214.
2. Кодина, Г. Е. Методы получения радиофармацевтических препаратов и радионуклидных генераторов для ядерной медицины / Г. Е. Кодина, Р. Н. Красикова. – М. : МЭИ, 2014. – 282 с.
3. Рыжов, С. А. К вопросу о безопасности персонала в отделении ядерной медицины / С. А. Рыжов, А. В. Водватов, Ю. В. Дружинина // Актуальные проблемы разработки, производства и применения радиофармацевтических препаратов: сб. тез. докл. IV Междунар. науч.-практ. конф. «РАДИОФАРМА-2021», М., 30 сент. – 3 окт. 2021 г. / ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России ; под ред. Г. Е. Кодиной, А. А. Лабушкиной. – М., 2021. – С. 54.
4. Позитронно-эмиссионная томография Ч. 1: Характеристика метода. Получение радиофармпрепаратов / С. Д. Бринкевич [и др.] // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2013. – № 2 – С. 129–137.
5. Consideration, measurements and logistics associated with low-energy cyclotron decommissioning / J. J. Sunderland [et al.] // 14th Intern. Workshop on Targetry and Target Chemistry. AIP Conf. Proc. – 2012. – Vol. 1509. – P. 16–20. – DOI: [10.1063/1.4773931](https://doi.org/10.1063/1.4773931).



6. Brinkevich, D. I. Activation of the cooling circuit water of the Cyclone 18/9-NC cyclotron during the production of  $^{18}\text{F}$  / D. I. Brinkevich, A. Ya. Maliborski, S. D. Brinkevich // *Physics of atomic nuclei*. – 2019. – Vol. 82, № 12. – P. 1714–1720. – DOI: [10.1134/S1063778819120044](https://doi.org/10.1134/S1063778819120044).
7. Measurements of residual radioactivity of machine elements and concrete on the cyclotron decommissioning / T. Shiomi [et al.] // *J. Nuclear Science Technology*. – March 2000. – S. 1. – P. 357–361.
8. Бринкевич, С. Д. Активационные радионуклиды при облучении ниобиевой мишени на циклотроне Cyclone 18/9 NC / С. Д. Бринкевич, Д. И. Бринкевич, А. Н. Кийко // *Ядерная физика и инжиниринг*. – 2019. – Т. 10. – № 6. – С. 574–580.
9. Radionuclide impurities in proton-irradiated  $^{18}\text{O}$  for the production of  $^{18}\text{F}$ : Activities and distribution in the  $^{18}\text{F}$ FDG synthesis process / L. Bowden [et al.] // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2009. – Vol. 67. – P. 248–255.
10. Distribution and separation of metallic and radionuclidic impurities in the production of  $^{18}\text{F}$ -fluorodeoxyglucose / K. Kilian [et al.] // *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2016. – Vol. 307, № 2. – P. 1037–1043.
11. Avila-Rodriguez, M. A. A quantitative and comparative study of radionuclidic and chemical impurities in water samples irradiated in a niobium target with Havar vs niobium-sputtered Havar as entrance foils / M. A. Avila-Rodriguez, J. S. Wilson, S. A. McQuarrie // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2008. – Vol. 66, № 12. – P. 1775–1780.
12. Schlyer, D. J. Impurities in the  $^{18}\text{O}$  water target and their effect on the yield of an aromatic displacement reaction with  $^{18}\text{F}$  fluoride / D. J. Schlyer, M. L. Firouzbakht, A. P. Wolf // *Applied Radiation and Isotopes*. – 1993. – Vol. 44, № 12. – P. 1459–1465.
13. Разделение долгоживущих радионуклидов на анионообменном картридже QMA light при производстве радиофармпрепаратов на основе  $^{18}\text{F}$  / В. О. Крот [и др.] // *Радиохимия*. – 2021. – Т. 63, № 2. – С. 193–200.
14. Переработка облученной воды  $^{18}\text{O}$  в условиях ПЭТ-центра / С. Д. Бринкевич [и др.] // *Радиохимия*. – 2019. – Т. 61, № 4. – С. 344–350.
15. Monte Carlo simulation and radiometric characterization of proton irradiated  $^{18}\text{O}$  for the treatment of the waste streams originated from  $^{18}\text{F}$ FDG synthesis process / R. Remetti [et al.] // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2011. – Vol. 69. – P. 1046–1051.
16. Activation of air and concrete in medical isotope production facilities. / A. C. Dodd [et al.] // *AIP Conference Proceedings*. – 2017. – Vol. 1845. – DOI: [10.1063/1.4983537](https://doi.org/10.1063/1.4983537).
17. Обращение с водными радиоактивными отходами при производстве радиофармпрепаратов на основе  $^{18}\text{F}$  / В. О. Крот [и др.] // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки*. – 2018. – № 4. – С. 128–134.
18. Долгоживущие радионуклиды при производстве  $^{18}\text{F}$  фторхолина для ПЭТ-диагностики / П. В. Тылец [и др.] // *Изв. НАН Беларуси. Сер. химических наук*. – 2018. – № 3. – С. 359–368.
19. Quantification of the activity of tritium produced during the routine synthesis of  $^{18}\text{F}$  fluorodeoxyglucose for positron emission tomography / C. Marshall [et al.] // *J. Radiological Protection*. – 2014. – Vol. 34. – P. 435–444. – DOI: [10.1088/0952-4746/34/2/435](https://doi.org/10.1088/0952-4746/34/2/435).
20. Measurement of the induced radionuclides in production of radiopharmaceuticals for positron emission tomography (PET) / S. Mochizuki [et al.] // *J. Nuclear Science and Technology*. – 2006. – Vol. 43, № 4. – P. 348–353.
21. Radionuclide impurities in  $^{18}\text{F}$ F- and  $^{18}\text{F}$ FDG for positron emission tomography / M. Kohler [et al.] // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2013. – Vol. 81. – P. 268–271.
22. Niobium sputtered Havar foil for the high-power production of reactive  $^{18}\text{F}$  fluoride by proton irradiation of  $^{18}\text{O}$  H<sub>2</sub>O targets / J. S. Wilson [et al.] // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2008. – Vol. 66. – P. 565–570.
23. Assessment of radionuclidic impurities in 2- $^{18}\text{F}$  fluoro-2-deoxy-d-glucose ( $^{18}\text{F}$ FDG) routine production / M. Marengo [et al.] // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2008. – Vol. 66, № 3. – P. 295–302.
24. Measurement of long lived radioactive impurities retained in the disposable cassettes on the Tracerlab MX system during the production of  $^{18}\text{F}$ FDG / D. Ferguson [et al.] // *Appl. Radiat. Isotopes*. 2011. – Vol. 69, № 10. – P. 1479–1485. – DOI: [10.1016/j.apradiso.2011.05.028](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.05.028).
25. Measurement of the residual radioactivity induced in the front foil of a target assembly in a modern medical cyclotron / R. C. O'Donnell [et al.] // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2004. – V. 60, № 2–4. – P. 539–542.
26. Radionuclidic purity tests in  $^{18}\text{F}$  radiopharmaceuticals production process / T. Dziel [et al.] // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2016. – Vol. 109, № 2. – P. 242–246.
27. Radioactive byproducts in  $^{18}\text{O}$  H<sub>2</sub>O used to produce  $^{18}\text{F}$  for  $^{18}\text{F}$ FDG synthesis / S. Ito [et al.] // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2006. – Vol. 64, № 3. – P. 298–305.
28. Пленки пиролитического графита, облученного ионами водорода H<sup>+</sup> / С. А. Вабищевич [и др.] // *Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 13 междунар. конф., Минск, 30 сент. – 3 окт. 2019 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В. В. Углов (отв. ред.) [и др.]*. – Минск, 2019. – С. 43–45.
29. Gamma-ray spectrometric characterization of waste activated target components in a PET cyclotron / P. Guarino [et al.] // *Cyclotrons and Their Applications–2007: Eighteenth International Conference (01–05.10.2007)*. Giardini Naxos, Italy. – P. 295–297.
30. Influence of the microstructure on the diffusion barrier performance of Nb-based coatings for cyclotron targets / V. Palmieri [et al.] // *J. Vacuum Science & Technology*. – 2019. – Vol. 37, № 5. – DOI: [10.1116/1.5098168](https://doi.org/10.1116/1.5098168).
31. Measurement of activation products generated in the  $^{18}\text{F}$ FDG production by a 9.6 MeV cyclotron / J. C. Chávez [et al.] // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2016. – Vol. 126. – P. 32–36. – DOI: [10.1016/j.radphyschem.2016.05.006](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.05.006).
32. Long-lived contaminants in cyclotron-produced radiopharmaceuticals: measurement and dosimetry / R. L. Metzger [et al.] // *J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. – 2018. – Vol. 318. – P. 7–10. – DOI: [10.1007/s10967-018-5970-6](https://doi.org/10.1007/s10967-018-5970-6).
33. Сечение реакции  $^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$  на тепловых нейтронах / С. П. Макаров [и др.] // *Атомная энергия*. – 1991. – Т. 70, № 3. – С. 194–106.
34. Долгоживущие радионуклиды в производстве 2- $^{18}\text{F}$  фтордезоксиглюкозы / Д. И. Бринкевич [и др.] // *Медицинская физика*. – 2018. – № 1(77). – С. 80–88.

35. Alloni, D. Experimental and Monte Carlo characterization of radionuclidic impurities originated from proton irradiation of  $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$  in a modern medical cyclotron / D. Alloni, M. Prata, B. Smilgys // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2019. – V. 146. – P. 84–89. – DOI: [10.1016/j.apradiso.2019.01.026](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.01.026).
36. Исследование воздействия ионов криптона с энергией 305 MeV на высокоориентированный пиролитический графит / А. Ю. Дидык [и др.] // *Письма в ЖТФ*. – 2000. – Т. 26, N 17. – С. 1–5.
37. Using a clinical linac to determine the energy levels of  $^{92\text{m}}\text{Nb}$  via the photonuclear reaction / M. Aygun [et al.] // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2016. – Vol. 115, № 1. – P. 97–99.
38. Gillis, J. M. Analysis of metal radioisotope impurities generated in  $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$  during the cyclotron production of fluorine-18 / J. M. Gillis, N. Najim, J. Zweit // *Applied Radiation and Isotopes*. – 2006. – Vol. 64, № 3. – P. 431–434.
39. Очистка  $[^{18}\text{F}]$ фторида от долгоживущих радионуклидов при производстве  $[^{18}\text{F}]$ фтордезоксиглюкозы / А. А. Иванюкович [и др.] // *Медицинская физика*. – 2018. – № 4(80). – С. 59–65.
40. Иванов, С. Н. Влияние высокодозного нейтронного облучения на склонность к межкристаллитной коррозии аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н9Т / С. Н. Иванов, С. И. Поролло, А. М. Дворяшин // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы*. – 2006. – № 2. – С. 222–228.

## REFERENCES

1. Papash, A. I., & Alenitskii, Yu. G. (2008). Kommercheskie tsiklotrony. Chast' 1. Kommercheskie tsiklotrony v diapazone energii ot 10 do 30 MeV dlya proizvodstva izotopov [Commercial cyclotrons. Part 1. Commercial cyclotrons in the energy range from 10 to 30 MeV for isotope production]. *Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra [Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei]: Vol. 39, iss 4 (1150–1214)*. (In Russ.).
2. Kodina, G. E., & Krasikova, R. N. (2014). *Metody polucheniya radiofarmatsevticheskikh preparatov i radionuklidnykh generatorov dlya yadernoi meditsiny [Methods for obtaining radiopharmaceuticals and radionuclide generators for nuclear medicine]*. Moscow: MEI. (In Russ.).
3. Ryzhov, S. A., Vodvatov, A. V., & Druzhinina, Yu. V. (2021). K voprosu o bezopasnosti personala v otdelenii yadernoi meditsiny. [On the issue of personnel safety in the nuclear medicine department]. In G. E. Kodina & A. A. Labushkina (Eds.) *Aktual'nye problemy razrabotki, proizvodstva i primeneniya radiofarmatsevticheskikh preparatov: sb. tez. dokl. [Actual problems of development, production and use of radiopharmaceuticals]* (54). Moscow: FMBC – FMBA. (In Russ.).
4. Brinkevich, S. D., Sukonko, O. G., Chizh, G. V., & Naumovich, A. S. (2013). Pozitronno-emissionnaya tomografiya. Chast' 1: Kharakteristika metoda. Poluchenie radiofarmpreparatov [Positron emission tomography. Part 1: Method description. Production of radiopharmaceuticals]. *Mediko-biologicheskie problemy zhiznedeyatel'nosti [Medical and Biological Problems of Life Activity]*, (2), 129–137. (In Russ., abstr. in Engl.).
5. Sunderland, J. J., Erdahl, C. E., Bender, B. R., Sensoy, L., & Watkins, G. L. (2012). Consideration, measurements and logistics associated with low-energy cyclotron decommissioning. *14<sup>th</sup> Intern. Workshop on Targetry and Target Chemistry. AIP Conf. Proc. V. 1509*. (16–20). DOI: [10.1063/1.4773931](https://doi.org/10.1063/1.4773931).
6. Brinkevich, D. I., Maliborski, A. Ya., & Brinkevich, S. D. (2019). Activation of the cooling circuit water of the Cyclone 18/9-HC cyclotron during the production of  $^{18}\text{F}$ . *Physics of atomic nuclei*, 82(12), 1714–1720. DOI: [10.1134/S1063778819120044](https://doi.org/10.1134/S1063778819120044).
7. Shiomi, T., Azeyanagi Y., Yamadera, A., & Nakamura, T. (2000). Measurements of residual radioactivity of machine elements and concrete on the cyclotron decommissioning. *J. Nuclear Science Technology*, (1), 357–361.
8. Brinkevich, S. D., Brinkevich, D. I., & Kiiko A. N. (2019). Aktivatsionnye radionuklidy pri obluchenii niobievoi misheni na tsiklotrone Cyclone 18/9 HC [Activation radionuclides during irradiation of a niobium target at the Cyclone 18/9 HC cyclotron]. *Yadernaya fizika i inzhiniring [Nuclear Physics and Engineering]*, 10(6), 574–580. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Bowden, L., Vintro, L. L., Mitchell, P. I., O'Donnell, R. G., Seymour, A. M., & Duffy G. J. (2009). Radionuclide impurities in proton-irradiated  $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$  for the production of  $^{18}\text{F}$ : Activities and distribution in the  $[^{18}\text{F}]$ FDG synthesis process. *Applied Radiation and Isotopes: Vol. 67*. (248–255).
10. Kilian, K., Pegier, M., Pecal, A., & Pyrzynska, K. (2016). Distribution and separation of metallic and radionuclidic impurities in the production of  $^{18}\text{F}$ -fluorodeoxyglucose. *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 307(2), 1037–1043.
11. Avila-Rodriguez, M. A., Wilson, J. S., & McQuarrie S. A. (2008). A quantitative and comparative study of radionuclidic and chemical impurities in water samples irradiated in a niobium target with Havar vs niobium-sputtered Havar as entrance foils. *Applied Radiation and Isotopes*, 66(12), 1775–1780.
12. Schlyer, D. J., Firouzbakht, M. L., & Wolf, A. P. (1993). Impurities in the  $[^{18}\text{O}]$ water target and their effect on the yield of an aromatic displacement reaction with  $[^{18}\text{F}]$ fluoride. *Applied Radiation and Isotopes*, 44(12), 1459–1465.
13. Krot, V. O., Brinkevich, S. D., Brinkevich, D. I., & Ivanyukovich, A. A. (2021). Razdelenie dolgozhivushchikh radionuklidov na anionoobmennom kartridzhe QMA light pri proizvodstve radiofarmpreparatov na osnove  $^{18}\text{F}$  [Separation of long-lived radionuclides on a QMA light anion exchange cartridge in the production of radiopharmaceuticals based on  $^{18}\text{F}$ ]. *Radiokhimiya [Radiochemistry]*, 63(2), 193–200. (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Brinkevich, S. D., Krot, V. O., Brinkevich, D. I., Tugai, O. V., Edimecheva, I. P., & Ivanyukovich, A. A. Pererabotka obluchennoi vody  $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$  v usloviyakh PET-tsentra [Processing of irradiated water  $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$  in a PET center]. *Radiokhimiya [Radiochemistry]*, 61(4), 344–350.
15. Remetti, R., Burgio, N. T., Maciocco, L., Arcese, M., & Filannino, M. A. (2011). Monte Carlo simulation and radiometric characterization of proton irradiated  $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$  for the treatment of the waste streams originated from  $[^{18}\text{F}]$ FDG synthesis process. *Applied Radiation and Isotopes*, 69, 1046–1051.
16. Dodd, A. C., Shackelton, R. J., Carr, D. A., & Ismail, A. (2017). Activation of air and concrete in medical isotope production facilities. *AIP Conference Proceedings: Vol. 1845*. DOI: [10.1063/1.4983537](https://doi.org/10.1063/1.4983537).

17. Krot, V. O., Tugai, O. V., Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., Chizh, G. V., & Vabishchevich, S. A. (2018). Obrashchenie s vodnymi radioaktivnymi otkhodami pri proizvodstve radiofarmpreparatov na osnove  $^{18}\text{F}$  [Handling of aqueous radioactive waste in the production of radiopharmaceuticals based on  $^{18}\text{F}$ ]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (4), 128–134.
18. Tylets, P. V., Tugai, O. V., Krot, V. O., Ivanyukovich, A. A., Soroka, S. A., Brinkevich, D. I., ... Chizh, G. V. (2018). Dolgozhivushchie radionuklidy pri proizvodstve [ $^{18}\text{F}$ ]ftorkholina dlya PET-dagnostiki [Long-lived radionuclides in the production of [ $^{18}\text{F}$ ]fluorocholine for PET-diagnosis]. *Izvestiya Natsional'noi akademii nauk Belarusi. Seriya khimicheskikh nauk [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, Chemical Series]*, 54(3), 359–368. DOI: [10.29235/1561-8331-2018-54-3-359-368](https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-3-359-368).
19. Marshall, C., Talboys, M. A., Bukhari, S., & Evans, W. D. (2014). Quantification of the activity of tritium produced during the routine synthesis of  $^{18}\text{F}$  fluorodeoxyglucose for positron emission tomography. *J. Radiological Protection*, 34(2), 435–444. DOI: [10.1088/0952-4746/34/2/435](https://doi.org/10.1088/0952-4746/34/2/435).
20. Mochizuki, S., Ogata, Y., Natano, K., Abe, J., Ito, K., Ito, Y., ... Ishigure, N. (2006). Measurement of the induced radionuclides in production of radiopharmaceuticals for positron emission tomography (PET). *J. Nuclear Science and Technology*, 43(4), 348–353.
21. Kohler, M., Degering, D., Zessin, J., Fuchtnner, F., & Konheiser, J. (2013). Radionuclide impurities in [ $^{18}\text{F}$ ]F- and [ $^{18}\text{F}$ ]FDG for positron emission tomography. *Applied Radiation and Isotopes*, (81), 268–271. DOI: [10.1016/j.apradiso.2013.03.044](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.03.044).
22. Wilson, J. S., Avila-Rodriguez, M. A., Johnson, R. R., Zyuzin, A., & McQuarrie, S. A. (2008). Niobium sputtered Havar foil for the high-power production of reactive [ $^{18}\text{F}$ ]fluoride by proton irradiation of [ $^{18}\text{O}$ ]H<sub>2</sub>O targets. *Applied Radiation and Isotopes*, (66), 565–570.
23. Marengo, M., Lodi, F., Magi, S., Cicoria, G., Pancaldi, D., & Boschi, S. (2008). Assessment of radionuclidic impurities in 2- [ $^{18}\text{F}$ ]fluoro-2-deoxy-d-glucose ([ $^{18}\text{F}$ ]FDG) routine production. *Applied Radiation and Isotopes*, 66(3), 295–302.
24. Ferguson, D., Orr, P., Gillanders, J., Corrigan, G., & Marshall, C. (2011). Measurement of long lived radioactive impurities retained in the disposable cassettes on the Tracerlab MX system during the production of [ $^{18}\text{F}$ ]FDG. *Applied Radiation and Isotopes*, 69(10), 1479–1485. DOI: [10.1016/j.apradiso.2011.05.028](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.05.028).
25. O'Donnell, R. C., Leon Vintro, I., Duffy, C. J., & Mitchell, P. I. (2004). Measurement of the residual radioactivity induced in the front foil of a target assembly in a modern medical cyclotron. *Applied Radiation and Isotopes*, 60(2–4), 539–542.
26. Dziel, T., Tyminski, Z., Sobczyk, K., Walecka-Mazur, A., & Kozanecki, P. (2016). Radionuclidic purity tests in  $^{18}\text{F}$  radiopharmaceuticals production process. *Applied Radiation and Isotopes*, 109(2), 242–246.
27. Ito, S., Sakane, H., Deji, S., Saze, T., & Nishizawa, K. (2006). Radioactive byproducts in [ $^{18}\text{O}$ ]H<sub>2</sub>O used to produce  $^{18}\text{F}$  for [ $^{18}\text{F}$ ]FDG synthesis. *Applied Radiation and Isotopes*, 64(3), 298–305.
28. Vabishchevich, S. A., Vabishchevich, N. V., Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., & Nevzorov, D. I. (2019). Plenki piroliticheskogo grafit, oblučennoho ionami vodoroda N<sup>+</sup> [Films of pyrolytic graphite irradiated with hydrogen ions H<sup>+</sup>]. *Vzaimodeistvie izlucheni s tverdyim telom. [Interaction of radiation with a solid body]* (43–45). Minsk: Publ. BSU. (In Russ., abstr. in Engl.).
29. Guarino, P., Rizzo, S., Tomarchio, E., & Greco, D. (2007). Gamma-ray spectrometric characterization of waste activated target components in a PET cyclotron. *Cyclotrons and Their Applications–2007* (295–297). Giardini Naxos, Italy.
30. Palmieri, V., Azzolini, O., Bempozad, E., De Felicis, D., Johnson, R.R., Renzelli, M., & Sciarova, H. (2019). Influence of the microstructure on the diffusion barrier performance of Nb-based coatings for cyclotron targets. *J. Vacuum Science & Technology*, 37(5). DOI: [10.1116/1.5098168](https://doi.org/10.1116/1.5098168).
31. Chávez, J. C., Vargas, M. J., & Sánchez R. (2016). Measurement of activation products generated in the [ $^{18}\text{F}$ ]FDG production by a 9.6 MeV cyclotron. *Radiation Physics and Chemistry*, (126), 32–36. – DOI: [10.1016/j.radphyschem.2016.05.006](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2016.05.006).
32. Metzger, R. L., Lasche, G. P., Eckerman, K. F., & Leggett R. W. (2018). Long-lived contaminants in cyclotron-produced radiopharmaceuticals: measurement and dosimetry. *J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, (318), 7–10. DOI: [10.1007/s10967-018-5970-6](https://doi.org/10.1007/s10967-018-5970-6).
33. Makarov, S. P., Pik-Pichak, G. A., Rodionov, Yu. F., Khmyzov, V. V., & Yashin, Yu. A. (1991). Sechenie reaktsii  $^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$  na teplovykh neitronakh [Cross section of the reaction  $^{54}\text{Fe}(n,\alpha)^{51}\text{Cr}$  on thermal neutrons]. *Atomnaya energiya [Atomic Energy]*, 70(3), 194–106. (In Russ., abstr. in Engl.).
34. Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., Baranovskii, O. A., Chizh, G. V., & Ivanyukovich, A. A. (2018). Dolgozhivushchie radionuklidy v proizvodstve 2- [ $^{18}\text{F}$ ]ftordezoksiglyukozy [Long-lived radionuclides in the production of 2- [ $^{18}\text{F}$ ]fluorodeoxyglucose.]. *Meditsinskaya fizika [Medical physics]*, 1(77), 80–88.
35. Alloni, D., Prata, M., & Smilgys B. (2019). Experimental and Monte Carlo characterization of radionuclidic impurities originated from proton irradiation of [ $^{18}\text{O}$ ]H<sub>2</sub>O in a modern medical cyclotron. *Applied Radiation and Isotopes*, (146), 84–89. DOI: [10.1016/j.apradiso.2019.01.026](https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2019.01.026).
36. Didyk, A. Yu., Latyshev, S. V., Semina, V. K., Stepanov, A.E., Suvorov, A. L., Fedotov, A. S., & Cheblukov, Yu. N. (2000). Issledovanie vozdeistviya ionov kripton s energiei 305 MeV na vysokoorientirovanniy piroliticheskii grafit [Investigation of the effect of krypton ions with an energy of 305 MeV on highly oriented pyrolytic graphite.]. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki [Technical Physics Letters]*, 26(17), 1–5. (In Russ., abstr. in Engl.).
37. Aygun, M., Cesur, A., Dogru, M., Boztosun, I., Dapo, H., Kanarya, M., ... Karatepe, S. (2016). Using a clinical linac to determine the energy levels of  $^{92\text{m}}\text{Nb}$  via the photonuclear reaction. *Applied Radiation and Isotopes*, 115(1), 97–99.
38. Gillis, J. M., Najim, N., & Zweit, J. (2006). Analysis of metal radioisotope impurities generated in [ $^{18}\text{O}$ ]H<sub>2</sub>O during the cyclotron production of fluorine-18. *Applied Radiation and Isotopes*, 64(3), 431–434.
39. Ivanyukovich, A. A., Soroka, S. A., Krot, V. O., Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., Chizh, G. V., & Sverdlov, R. L. (2018). Ochistka [ $^{18}\text{F}$ ]ftorida ot dolgozhivushchikh radionuklidov pri proizvodstve [ $^{18}\text{F}$ ]ftordezoksiglyukozy [Purification

- of [ $^{18}\text{F}$ ]fluoride from long-lived radionuclides in the production of [ $^{18}\text{F}$ ]fluorodeoxyglucose]. *Meditsinskaya fizika [Medical Physics]*, 4(80), 59–65. (In Russ., abstr. in Engl.).
40. Ivanov, S. N., Porollo, S. I., & Dvoryashin, A. M. (2006). Vliyanie vysokodoznogo neutronnogo oblucheniya na sklonost' k mezhkristallitnoi korrozii austenitnoi nerzhaveyushchei stali 12X18H9T. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Ser. Materialovedenie i novye materialy*, (2), 222–228. (In Russ.).

Поступила 17.03.2022

#### ACCUMULATION OF RADIONUCLIDES IN REPLACEABLE PARTS AND WATER TARGET CYCLOTRON

A. KIYKO, S. VABISHCHEVICH, N. VABISHCHEVICH, D. BRINKEVICH

*The accumulation of unwanted long-lived radionuclides during the production of  $^{18}\text{F}$ -based radiopharmaceuticals using the IBA Cyclone 18/9 HC cyclotron is considered. Using high-resolution gamma-ray spectrometry with HPGe detectors, the identification of radionuclides and the assessment of activity in activated components (stripper, target entrance window) of the "medical" 18-MeV cyclotron IBA Cyclone 18/9 were carried out. More than 20 unwanted radionuclides have been identified in irradiated water. Various mechanisms for the entry of long-lived radionuclides into irradiated water are described. The results obtained are of great importance for optimizing the methods of radioactive waste management in the production of radiopharmaceuticals and, as a result, minimizing the radiation exposure of personnel.*

**Keywords:** radiopharmaceuticals, radionuclides, cyclotron,  $^{18}\text{O}$  enriched water, proton irradiation.