

# ГЕНЕРАТОР АКТИНИЯ-228 И ИЗУЧЕНИЕ СОРБЦИИ АКТИНИЯ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОМАТЕРИАЛАМИ

© 2020 г. А. Г. Казаков<sup>a,\*</sup>, Б. Л. Гаращенко<sup>a</sup>, Р. Ю. Яковлев<sup>a</sup>,  
С. Е. Винокуров<sup>a</sup>, С. Н. Калмыков<sup>a,b</sup>, Б. Ф. Мясоедов<sup>a-c</sup>

<sup>a</sup> Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, 119991, Москва, ул. Косыгина, 19, Россия

<sup>b</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, химический факультет,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1

<sup>c</sup> Межведомственный центр аналитических исследований в области физики, химии и биологии РАН,  
117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65, стр. 6

\*e-mail: adeptak92@mail.ru

Получена 29.11.2019, после доработки 19.02.2020, принята к публикации 20.02.2020

Разработан способ выделения <sup>228</sup>Ac из выдержанных препаратов природного <sup>232</sup>Th. Макроколичества нитрата тория (20 г) отделяли его экстракцией раствором ди-(2-этилгексил)фосфорной кислоты в толуоле из растворов 4 М HNO<sub>3</sub>, при этом микроколичества <sup>228</sup>Ra и <sup>228</sup>Ac оставались в водной фазе. Из полученного раствора <sup>228</sup>Ac избирательно выделяли методом экстракционной хроматографии на колонке с сорбентом RE gesin, а <sup>228</sup>Ra количественно оставался в элюате 4 М HNO<sub>3</sub>. С колонки <sup>228</sup>Ac вымывался 0.05 М HNO<sub>3</sub> и мог использоваться в качестве радиоизотопа для проведения научных исследований. Раствор <sup>228</sup>Ra в 4 М HNO<sub>3</sub> после накопления в нем дочернего <sup>228</sup>Ac повторно пропускали через такую же колонку. Получаемый <sup>228</sup>Ac использовали в работе для изучения его сорбции на коммерческих и модифицированных углеродных наноматериалах (УН) вместо труднодоступного <sup>225</sup>Ac. Показана перспективность применения УН как носителей изотопов актиния для целей ядерной медицины.

**Ключевые слова:** актиний-228, радиоизотопные генераторы, экстракционная хроматография

**DOI:** 10.31857/S0033831120050056

## ВВЕДЕНИЕ

Для таргетной альфа-терапии в ядерной медицине наиболее часто используется изотоп <sup>225</sup>Ac, претерпевающий три быстрых альфа-распада [1–3]. Для получения этого изотопа используют разные способы, в том числе при облучении ториевых мишеней протонами высоких энергий, однако этот метод не находит широкого применения, так как количество подходящих ускорителей в мире крайне мало, что вызывает проблемы с доступностью данного изотопа [4]. Кроме того, <sup>225</sup>Ac не вполне удобен для доклинических исследований, так как излучает гамма-кванты с низким выходом (не более 1% при 100 кэВ). В то же время гамма-излучающий изотоп <sup>228</sup>Ac ( $T_{1/2} = 6.1$  ч) присутствует в радиоактивном ряду распада природного тория как продукт распада материнского изотопа <sup>228</sup>Ra и может быть выделен в радиохимически чистом виде. К преимуществам <sup>228</sup>Ac, выделяемого из

<sup>228</sup>Ra, относятся долгий срок жизни материнского нуклида ( $T_{1/2} = 5.7$  лет) и отсутствие долгоживущих дочерних нуклидов. Активность <sup>228</sup>Ra, находящегося в вековом равновесии с <sup>232</sup>Th, составляет около 1.6 кБк на 1 г нитрата тория, поэтому, выделяя <sup>228</sup>Ra из граммовых количеств нитрата тория, можно ежедневно извлекать из генератора <sup>228</sup>Ac с активностью, достаточной для проведения исследований, в том числе *in vivo* (единицы и десятки кБк).

Из литературы известны различные методы разделения Th, Ra и Ac [4–10]. Для разделения <sup>228</sup>Ra и <sup>232</sup>Th, как правило, применяют методы соосаждения радия и его экстракции в различных системах [4, 5]. Для разделения актиния и радия применяли методы ионообменной хроматографии [6, 7], экстракции [8], избирательной сорбции [9] и экстракционной хроматографии [4, 6, 10]. В этих работах использовали небольшие количества <sup>232</sup>Th или следовые количества <sup>229</sup>Th. В то же время в лите-

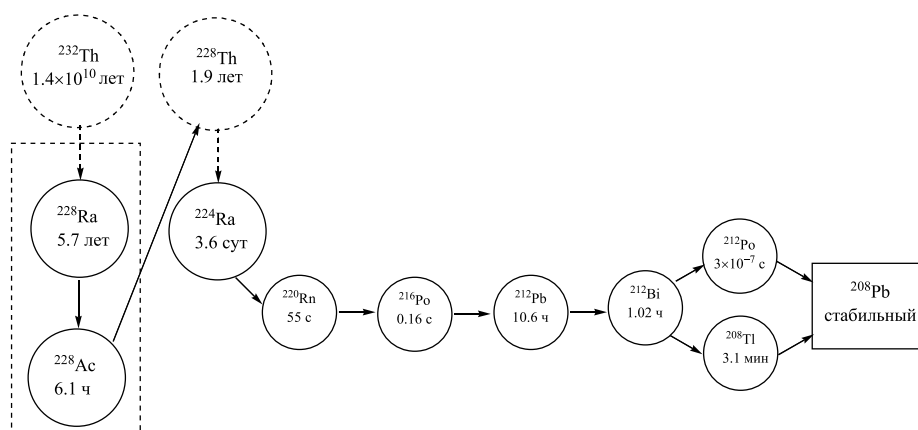


Рис. 1. Ряд распада  $^{232}\text{Th}$ , содержащий генераторную пару  $^{228}\text{Ra}/^{228}\text{Ac}$

ратуре отсутствует информация о выделении  $^{228}\text{Ac}$  из больших количеств  $^{232}\text{Th}$  (десятков грамм).

В исследованиях возможности адресной доставки актиния изучена сорбция  $^{225}\text{Ac}$  на различных носителях в составе радиофармпрепаратов. Так, показана возможность применения липосомальных носителей [11–14] или наночастиц на основе неорганических веществ –  $\text{LaPO}_4$  [15–19],  $\text{InPO}_4$  [20],  $\text{GdVO}_4$  [21] и  $\text{TiO}_2$  [22].

В то же время применение углеродных наноматериалов (УН) выглядит перспективным вследствие их существенных достоинств: потенциальной биосовместимости их отдельных форм, доступности в промышленных объемах, низкой, по сравнению с векторными молекулами, стоимости и возможности варьирования их биораспределения при соответствующей модификации. При этом сведения об использовании УН как носителей актиния крайне ограничены [23, 24]. В этой связи цель настоящей работы состояла в разработке метода количественного выделения  $^{228}\text{Ac}$  как продукта распада  $^{228}\text{Ra}$  из природного тория с их последующим разделением и использование выделяемого  $^{228}\text{Ac}$  в радиохимически чистом состоянии для исследований сорбции актиния на образцах УН различной структуры и физико-химических свойств.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

**Разработка методики выделения радиохимически чистого  $^{228}\text{Ac}$  из природного тория.** В исследованиях использовали нитрат тория (навески массой до 20 г) с накопленными в течение 60 лет продуктами распада. Все использованные в работе химические реагенты имели чистоту не ниже х.ч.

Получение очищенного препарата  $^{228}\text{Ac}$  проходило в несколько стадий; на первой стадии достигается отделение макроколичеств  $^{232}\text{Th}$  и накопившегося  $^{228}\text{Th}$  от смеси продуктов их распада (рис. 1) экстракцией тория раствором 1 : 1 ди(2-этилгексил)фосфорной кислоты (Д2ЭГФК) в толуоле из растворов 4 М  $\text{HNO}_3$ . Выбор экстрагента обусловлен проведенными ранее исследованиями [4], где было установлено, что лучшим экстрагентом из изученных для отделения  $^{232}\text{Th}$  от продуктов, образующихся при его облучении протонами высоких энергий (а также радия и актиния), является Д2ЭГФК, которая экстрагирует  $^{232}\text{Th}$  из азотнокислых растворов в широком диапазоне концентраций  $\text{HNO}_3$  [25–27]. Фазы интенсивно перемешивали в течение 5 мин, центрифугировали, затем разделяли в делительной воронке. Экстракцию проводили три раза, а водный раствор с  $^{228}\text{Ra}$  для более полной очистки от тория пропускали затем через колонку с экстракционно-хроматографическим сорбентом LN (Triskem Int., Франция, основа – Д2ЭГФК, размер зерен 100–150 меш). Сорбент прочно удерживает торий в широком интервале концентраций  $\text{HNO}_3$ , при этом радий и актиний не удерживаются на нем при концентрациях  $\text{HNO}_3$  выше 0.2 М [28].

Оставшаяся после отделения изотопов тория смесь нуклидов содержит  $^{228}\text{Ra}$  (в котором накапливается  $^{228}\text{Ac}$ ), а также  $^{224}\text{Ra}$  (в равновесии с другими продуктами распада, в том числе газообразным  $^{220}\text{Rn}$ ) и стабильный  $^{208}\text{Pb}$ . Одностадийное выделение  $^{228}\text{Ac}$  из такой смеси представляет собой сложную задачу, и для получения радиохимически чистого  $^{228}\text{Ac}$  необходима глубокая очистка от  $^{224}\text{Ra}$ . По этой причине полученную

смесь выдерживали 1 месяц до полного распада  $^{224}\text{Ra}$ . На заключительной стадии  $^{228}\text{Ac}$  отделяли от  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{208}\text{Pb}$  и вновь образующегося  $^{228}\text{Th}$ . Для этого раствор  $^{228}\text{Ra}$  в  $\text{HNO}_3$  упаривали досуха в стеклянном флаконе на электроплитке; растворяли в 4 М  $\text{HNO}_3$ ; и раствор помещали в колонку с экстракционно-хроматографическим сорбентом RE (Triskem Int., Франция, основа – карбамоил-метилфосфиноксид и трибутилфосфат) объемом 2 мл. Разделение  $^{228}\text{Ra}$  и  $^{228}\text{Ac}$  проводили путем селективного элюирования с колонки: сначала элюировали  $^{228}\text{Ra}$  раствором 4 М  $\text{HNO}_3$ , затем  $^{228}\text{Ac}$  – в 0.05 М  $\text{HNO}_3$ , собирая фракции объемом 1 мл каждая. Чистоту  $^{228}\text{Ac}$  определяли путем регистрации его гамма-спектра в течение 3 сут. Для проведения экспериментов по сорбции актиния на УН элюат  $^{228}\text{Ac}$  в среде 0.05 М  $\text{HNO}_3$  упаривали досуха, растворяли в нескольких миллилитрах фосфатно-солевого буфера (ФБ) с рН 7.

**Гамма-спектрометрия.** Содержание тория, радия и актиния в образцах определяли методом гамма-спектрометрии при использовании спектрометра с детектором из высокочистого германия GR 3818 (Canberra Ind, США). Торий идентифицировали по гамма-линии  $^{228}\text{Th}$  с энергией 84.4 кэВ. Содержание  $^{228}\text{Ra}$  в образцах определяли по дополнительно введенному гамма-излучающему  $^{226}\text{Ra}$  (186 кэВ, 3.6%), полученному при растворении  $^{226}\text{RaBr}_2$  в 0.01 М  $\text{HCl}$ .  $^{228}\text{Ac}$  определяли по линиям 338 (11.3%) и 911 (25.8%) кэВ.

**Характеризация УН.** В работе использовали следующие коммерческие образцы УН: порошок детонационных наноалмазов (ДН) марки УДА-ТАН (ФГУП «СКТБ «Технолог», Россия), водную суспензию частично восстановленного оксида графита (ОГ) и порошок многостенных углеродных нанотрубок (НТ) (ООО «Нанотехцентр», Тамбов, Россия). Морфологию частиц УН определяли методом просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ПЭМ-ВР) с использованием прибора JEM-2100F/Cs/GIF (JEOL, Япония). Удельную поверхность УН определяли методом тепловой десорбции азота по модели БЭТ. Для определения содержания примесных элементов в УН использовали метод масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) (X Series 2, Thermo Scientific, США). Элементный состав поверхности УН определяли методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) (Kratos Axis Ultra DLD, Kratos Analytical, Велико-

британия). Гидродинамический диаметр частиц УН в гидрозольях определяли методом динамического рассеяния света (ДРС) на анализаторе ZetaSizer Nano ZS (Red Badge – 633 нм) ZEN 3600 (Malvern Instruments, США). Для определения кислотно-функциональных групп на поверхности УН использовали потенциометрическое титрование.

Модификацию поверхности образцов УН проводили согласно методикам, описанным в работах [29, 30]. Окисление ДН проводили в смеси  $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{HNO}_3$  (3 : 1) при 120°C в течение 1 сут, а гидрирование ОГ и НТ – в атмосфере  $\text{Ar}$  с 10%  $\text{H}_2$  при 800°C в течение 5 ч.

**Исследование сорбционного поведения  $^{228}\text{Ac}$  на УН.** При изучении сорбции  $\text{Ac(III)}$  на УН в полипропиленовые пробирки с крышкой помещали 100 мкл суспензии УН (1 г/л), добавляли 900 мкл полученного раствора  $^{228}\text{Ac}$ . Пробирки встряхивали на шейкере TS-100 (Biosan, Латвия), после чего центрифугировали на центрифуге CM-50 (Eppendorf, USA) в течение 20 мин при 18000 g. Затем регистрировали гамма-спектр раствора  $^{228}\text{Ac}$ , сравнивали скорость счета аликвоты раствора со скоростью счета образца сравнения. Для определения величины десорбции к оставшимся в пробирке раствору и осадку добавляли раствор бычьего сывороточного альбумина (БСА) в ФБ, содержание БСА в полученном растворе – 40 г/л. Содержимое пробирки взмучивали, помещали на шейкер, после чего фазы разделяли при центрифугировании для последующих радиометрических измерений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Разработка методики выделения радиохимически чистого  $^{228}\text{Ac}$  из природного тория.** Показано, что  $^{228,232}\text{Th}$  извлекается ДЭГФК из раствора 4 М  $\text{HNO}_3$  практически количественно (99%), а  $^{228}\text{Ra}$  при этом не экстрагируется. Дополнительную очистку остающегося в водной фазе  $^{228}\text{Ra}$  от тория осуществляли при пропускании через колонку с экстракционно-хроматографическим сорбентом LN; при этом в элюате содержится 99.9%  $^{228}\text{Ra}$  и не более 0.01%  $^{228,232}\text{Th}$ . Разделение  $^{228}\text{Ra}$  и  $^{228}\text{Ac}$  проводили экстракционно-хроматографическим методом на сорбенте RE. Как видно из данных рис. 2, на котором представлена хроматограмма разделения, во фракциях 2–5 мл количественно выделяется  $^{228}\text{Ra}$ , а 13–16 мл –  $^{228}\text{Ac}$ . Скорость течения элюата составила 1 мл/мин, что позво-

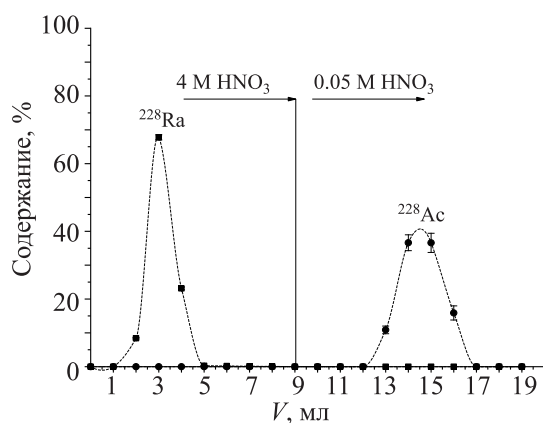


Рис. 2. Экстракционно-хроматографическое разделение  $^{228}\text{Ra}$  и  $^{228}\text{Ac}$  на сорбенте RE в среде  $\text{HNO}_3$ . Объем колонки 2 мл, диаметр 0.7 см.

ляет разделять  $^{228}\text{Ra}$  и  $^{228}\text{Ac}$  за 20 мин; при этом установлено, что выход  $^{228}\text{Ac}$  был близок к количественному (не менее 95 % от помещенного на колонку), а фактор разделения  $^{228}\text{Ra}$  и  $^{228}\text{Ac}$  –  $2.2 \times 10^4$ . Согласно работе [31],  $^{208}\text{Pb}$  элюируется с колонки вместе с  $^{228}\text{Ra}$ . Таким образом, разработан метод выделения  $^{228}\text{Ac}$  в радиохимически чистом состоянии из больших количеств природного тория. Выделенный  $^{228}\text{Ac}$  может использоваться в научных исследованиях, в том числе для *in vivo* экспериментов.

Установлено, что при реализации разработанного метода потери  $^{228}\text{Ra}$  составляют не более 0.005% от помещенного на колонку, поэтому исходный препарат  $^{228}\text{Ra}$  можно использовать многократно. Для этого фракции с 1 по 9 мл (рис. 2) упаривали и снова растворяли в 1 мл 4 М  $\text{HNO}_3$ . Показана воспроизводимость результатов, так как из созданного генератора удалось элюировать  $^{228}\text{Ac}$  не менее 20 раз. При длительном использовании раствора  $^{228}\text{Ra}$  происходит накопление  $^{228}\text{Th}$  за счет распада  $^{228}\text{Ac}$ , но  $^{228}\text{Th}$  по разработанной методике количественно сорбируется на колонке RE в процессе разделения  $^{228}\text{Ra}$  и  $^{228}\text{Ac}$  [31]. Колонки с сорбентом предполагаются для одноразового применения, поэтому  $^{228}\text{Th}$  не загрязняет приготавливаемый раствор  $^{228}\text{Ac}$ . При многолетнем использовании генератора экстракт  $^{232}\text{Th}$  можно повторно использовать для извлечения накопившегося в нём  $^{228}\text{Ra}$ .

**Характеризация образцов УН.** Физико-химические свойства исследованных коммерческих и модифицированных образцов УН представлены в

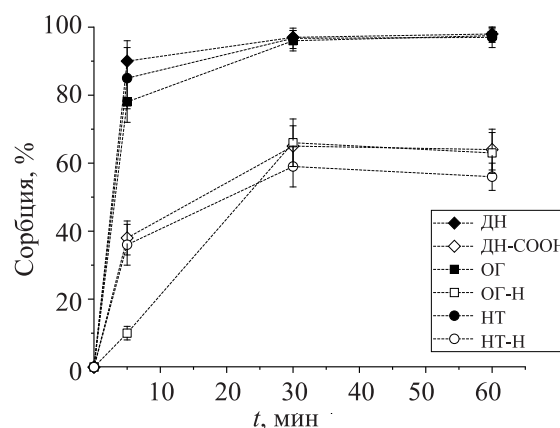


Рис. 3. Кинетика сорбции  $\text{As}(\text{III})$  на УН в ФБ при  $25^\circ\text{C}$ , отношение  $m/V$  100 мкг/мл.

таблице. Из таблицы видно, что использованные в работе УН значительно отличались как по структуре, так и по составу. Так, ДН представляют собой сферические частицы, ОГ – наночастицы плоского строения, а НТ имеют нитевидную структуру микронных размеров с внутренней полостью. Также образцы УН отличались по величине удельной поверхности, которая составила 240, 700 и 160  $\text{m}^2/\text{г}$  для ДН, ОГ и НТ соответственно. Установлено, что из исследованных УН ДН характеризуется наименьшим количеством примесей (до 1.4 мг/г). Показано, что модификация образцов при окислении и гидрировании привела к изменению состава поверхности УН, согласно данным РФЭС и потенциометрического титрования. Например, при окислении образца ДН количество карбоксильных групп на поверхности выросло в 3 раза (с 330 до 990  $\mu\text{моль}/\text{г}$ ).

**Изучение сорбции  $^{228}\text{Ac}$  на УН.** Изучена кинетика сорбции  $^{228}\text{Ac}$  на различных образцах УН в среде ФБ (рис. 3). Из данных рис. 3 видно, что сорбционное равновесие на всех изученных образцах УН достигается до 30 мин. Для образцов ДН, ОГ и НТ за 60 мин сорбция была близка к количественной (не менее 95%), а для всех модифицированных УН предельная величина сорбции составляет около 60%.

Установлено, что снижение соотношения массы УН к объему раствора со 100 до 10 мкг/мл не приводит к изменению величины сорбции. Это позволит значительно снизить массу вводимого конъюгата  $\text{As}(\text{III})@\text{УН}$  *in vivo*.

При исследовании десорбции  $^{228}\text{Ac}$  с образцов коммерческих УН в растворе БСА в ФБ показано,

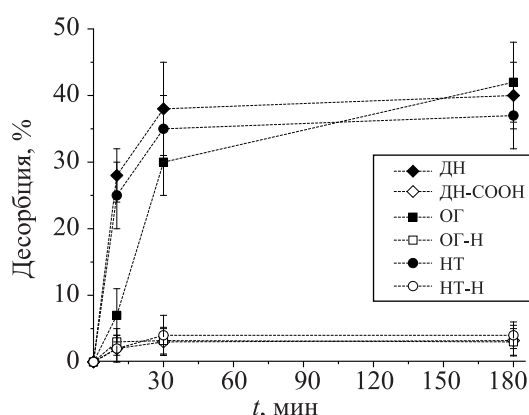


Рис. 4. Кинетика десорбции Ас(III) с УН в растворе БСА (40 г/л) в ФБ при 25°C, отношение  $m/V$  100 мкг/мл.

что за 30 мин десорбируется до 30–40% актиния, после чего в течение 150 мин величина десорбции существенно не изменяется (рис. 4). В то же время установлено, что десорбция  $^{228}\text{Ac}$  с образ-

цов ДН-СООН, ОГ-Н и НТ-Н в тех же условиях не превышает 5% за 3 ч. Изменение поведения Ас(III) при сорбции из ФБ и десорбции из БСА в ФБ для коммерческих ДН, ОГ, НТ и модифицированных ДН-СООН, ОГ-Н и НТ-Н можно объяснить различными факторами. Сорбцию Ас(III) на коммерческом образце ДН, вероятно, осуществляется по двух механизмам – прочному химическому связыванию  $^{228}\text{Ac}$  с карбоксильными группами и физической адсорбции на других группах поверхности ДН. В случае окисления ДН до ДН-СООН эти группы замещаются на карбоксильные, что негативно влияет на общую величину адсорбции, так как пропадает ее физическая составляющая, но положительно сказывается на прочности связывания конъюгата с актинием в растворе БСА в ФБ. Интерпретация подобных изменений для ОГ и ОГ-Н затруднительна, и требуется дальнейшее исследование механизма сорбции  $^{228}\text{Ac}$  на этих образцах. Что касается взаимодействия  $^{228}\text{Ac}$  с НТ,

#### Результаты характеристики образцов УН

Характеристики	Коммерческие образцы УН		
	ДН	ОГ	НТ
Размер частиц исходных образцов по данным ПЭМ-ВР, нм	3–10	Наноллисты – 2 Листы > 10 <sup>2</sup>	Длина > 2×10 <sup>4</sup> Диаметр – 30 Толщина стенки 5–10
Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	240	700	160
Общее содержание примесей по данным ИСП-МС, мг/г	1.4	3.0	14.0
Основные примеси (более 0.1 мг/г) и их содержание, мг/г	Fe – 0.538 Ti – 0.459 K – 0.156	Ti – 2.600 Al – 0.124	Mo – 6.880 Co – 5.830 Al – 0.635 Ni – 0.156
Элементный состав поверхности по данным РФЭС	C <sub>sp<sup>3</sup></sub> – 92.3% O – 7.7% N – 1.0%	C <sub>sp<sup>2</sup></sub> – 77.4% C <sub>sp<sup>3</sup></sub> – 7.9% O – 14.7%	C <sub>sp<sup>2</sup></sub> – 99.0% O – 1.0%
Размер частиц и их агрегатов в гидрозольях, нм	100	Наноллисты – 2 Листы <sup>a</sup>	a
Количество групп –СООН по данным титрования, мкмоль/г	330	–	–
Характеристики	Модифицированные образцы УН		
	ДН-СООН	ОГ-Н	НТ-Н
Количество групп –СООН по данным титрования, мкмоль/г	990	–	–
Размер частиц и их агрегатов в гидрозольях, нм	95	200 и 700	150 и 650
Элементный состав поверхности по данным РФЭС	C <sub>sp<sup>3</sup></sub> – 88.7% O – 9.9% N – 1.4%	C <sub>sp<sup>2</sup></sub> – 72.3% C <sub>sp<sup>3</sup></sub> – 24.6% O – 3.1%	C <sub>sp<sup>2</sup></sub> – 99.4% O – 0.6%

<sup>a</sup> Невозможно определить методом ДРС, если хотя бы один из линейных размеров частицы превышает 1000 нм.

то при сорбции, вероятно, реализуются два механизма: сорбция ионов внутри полостей трубок, как было ранее показано в работе [32], а также физическая сорбция на примесях металлов (см. таблицу), содержащегося на концах трубок. При гидрировании НТ катализатор удаляется, чем и можно объяснить падение суммарной величины сорбции и рост устойчивости к десорбции.

В заключение можно отметить, что все изученные УН перспективны для применения в ядерной медицине в качестве носителей актиния. В случае ограничения количеств радиоактивных изотопов актиния целесообразно использовать ДН, ОГ и НТ, для которых сорбция близка к количественной, тогда как для *in vivo* исследований наиболее подходящими являются ДН-СООН, ОГ-Н и НТ-Н, для которых в растворах модельной биологической среды значение десорбции за 3 ч составляет не более 5%, в то время как для исследованных коммерческих УН она составляет около 40%.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-13-00413).

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Blower P.J. // Dalton Trans. 2015. Vol. 44, N 11. P. 4819.
- Makvandi M., Dupis, E., Engle, J.W., Nortier, F.M., Fassbender, M.E., Simon, S., Birnbaum, E.R., Atcher, R.W., John, K.D., Rixe, O., Norenberg, J.P. // Target. Oncol. 2018. Vol. 13, N 2. P. 1893.
- Garashchenko B.L., Korsakova V.A., Yakovlev R.Y. // Phys. At. Nucl. 2018. Vol. 81, N 10. P. 1515.
- Aliiev R.A., Ermolaev S.V., Vasiliev A.N., Ostapenko V.S., Lapshina E.V., Zhuikov B.L., Zakharov N.V., Pozdeev V.V., Kokhanyuk V.M., Myasoedov B.F., Kalmykov S.N. // Solvent Extr. Ion Exch. 2014. Vol. 32, N 5. P. 468.
- Havelka M. // Appl. Radiat. Isot. 2016. Vol. 109. P. 222.
- Apostolidis C., Molinet R., Rasmussen G., Morgenstern A. // Anal. Chem. 2005. Vol. 77, N 19. P. 6288.
- Bhatki K.S., Adloff J.P. // Radiochim. Acta. 1964. Vol. 3, N 3. P. 59.
- Sekine T., Koike Y., Sakairi M. // J. Nucl. Sci. Technol. 1967. Vol. 4, N 6. P. 3081.
- Włodzimirska B., Barto B., Bilewicz A. // Radiochim. Acta. 2003. Vol. 91. P. 553.
- Zielinska B., Apostolidis C., Bruchertseifer F., Morgenstern A. // Solvent Extr. Ion Exch. 2007. Vol. 25, N 3. P. 339.
- Change M.Y., Seideman J., Sofou S. // Bioconjug. Chem. 2008. Vol. 19, N 6. P. 12742.
- Sempkowski M., Zhu C., Menzenski M.Z., Kevrekidis I.G., Bruchertseifer F., Morgenstern A., Sofou S. // Langmuir. 2016. Vol. 32, N 33. P. 83298.
- Sofou S., Kappel B.J., Jaggi J.S., McDevitt M.R., Scheinberg D.A., Sgouros G. // Bioconjug. Chem. 2007. Vol. 18, N 6. P. 20617.
- Sofou S., Thomas J.L., Lin H.Y., McDevitt M.R., Scheinberg D.A., Sgouros G. // J. Nucl. Med. 2004. Vol. 45, N 2. P. 253.
- Woodward J., Kennel S.J., Stuckey A., Osborne D., Wall J., Rondinone A.J., Standaert R.F., Mirzadeh S. // Bioconjug. Chem. 2011. Vol. 22, N 4. P. 766.
- McLaughlin M.F., Robertson D., Pevsner P.H., Wall J.S., Mirzadeh S., Kennel S.J. // Cancer Biother. Radiopharm. 2014. Vol. 29, N 1. P. 34.
- Rojas J.V., Woodward J.D., Chen N., Rondinone A.J., Castano C.H., Mirzadeh S. // Nucl. Med. Biol. 2015. Vol. 42, N 7. P. 614.
- McLaughlin M.F., Woodward J., Boll R.A., Wall S., Rondinone A.J., Kennel S.J., Mirzadeh S., Robertson J.D. // PLoS One. 2013. Vol. 8, N 1. P. 2.
- McLaughlin M.F., Woodward J., Boll R.A., Rondinone A.J., Mirzadeh S., Robertson J.D. // Radiochim. Acta. 2013. Vol. 101, N 9. P. 595.
- de Kruijff R.M., Drost K., Thijssen L., Morgenstern A., Bruchertseifer F., Lathouwers D., Wolterbeek H.T., Denkova A.G. // Appl. Radiat. Isot. 2017. Vol. 128. P. 1839.
- Toro-González M., Copping R., Mirzadeh S., Rojas J.V. // J. Mater. Chem. B. 2018. Vol. 6, N 47. P. 7985.
- Cędrowska E., Pruszyński M., Majkowska-Pilip A., Męczyńska-Wielgosz S., Bruchertseifer F., Morgenstern A., Bilewicz A. // J. Nanoparticle Res. 2018. Vol. 20, N 3. Art. 83.
- Zhang S., Yang K., Feng L., Liu Z. // Carbon. 2011. Vol. 49, N 12. P. 4040.
- Rosenblatt T.L., McDevitt M.R., Mulford D.A., Pandit-Taskar N., Divgi C.R., Panageas K.S., Heaney M.L., Chanel S., Morgenstern A., Sgouros G., Larson S.M., Scheinberg D.A., Jurcic J.G. // Clin. Cancer Res. 2010. Vol. 16, N 21. P. 5303.
- Zamani A.A., Yafitian M.R. // Sep. Purif. Technol. 2004. Vol. 40, N 2. P. 115.
- El-Sweify F.H., Abdel-Fattah A.A., Ali S.M. // J. Chem. Thermodyn. 2008. Vol. 40, N 5. P. 798.
- Gao S., Sun T., Chen Q., Shen X. // Radiochim. Acta. 2016. Vol. 104, N 7. P. 457.
- McAlister D.R., Horwitz P.E. // Solvent Extr. Ion Exch. 2007. Vol. 25, N 6. P. 757.
- Lisichkin G.V., Kulakova I.I., Gerasimov Y.A., Karpukhin A.V., Yakovlev R.Y. // Mendeleev Commun. 2009. Vol. 19, N 6. P. 309.
- Solomatin A.S., Yakovlev R.Y., Teplova V.V., Fedotcheva N.I., Kondrachova M.N., Kulakova I.I., Leonidov N.B. // J. Nanoparticle Res. 2018. Vol. 20, N 7. Art. 201.
- Dietz M.L., Horwitz E.P. // Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part. 1992. Vol. 43, N 9. P. 1093.
- Tan X.L., Xu D., Chen C.L., Wang X.K., Hu W.P. // Radiochim. Acta. 2008. Vol. 96, N 1. P. 23.