

ГЕНЕРАТОР АКТИНИЯ-228 И ИЗУЧЕНИЕ СОРБЦИИ АКТИНИЯ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОМАТЕРИАЛАМИ

© 2020 г. А. Г. Казаков^{a,*}, Б. Л. Гаращенко^a, Р. Ю. Яковлев^a,
С. Е. Винокуров^a, С. Н. Калмыков^{a,b}, Б. Ф. Мясоедов^{a-c}

^a Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, 119991, Москва, ул. Косыгина, 19, Россия

^b Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, химический факультет,
119991, Москва, Ленинские горы, 1

^c 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 ^{228}Ac из выдержаных препаратов природного ^{232}Th . Макроколичества нитрата тория (20 г) отделяли его экстракцией раствором ди-(2-этилгексил)fosфорной кислоты в толуоле из растворов 4 М HNO_3 , при этом микроколичества ^{228}Ra и ^{228}Ac оставались в водной фазе. Из полученного раствора ^{228}Ac избирательно выделяли методом экстракционной хроматографии на колонке с сорбентом RE resin, а ^{228}Ra количественно оставался в элюате 4 М HNO_3 . С колонки ^{228}Ac вымывался 0.05 М HNO_3 и мог использоваться в качестве радиоизотопа для проведения научных исследований. Раствор ^{228}Ra в 4 М HNO_3 после накопления в нем дочернего ^{228}Ac повторно пропускали через такую же колонку. Получаемый ^{228}Ac использовали в работе для изучения его сорбции на коммерческих и модифицированных углеродных наноматериалах (УН) вместо труднодоступного ^{225}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 ^{225}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, ^{225}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 ^{228}Ac ($T_{1/2} = 6.1$ ч) присутствует в радиоактивном ряду распада природного тория как продукт распада материнского изотопа ^{228}Ra и может быть выделен в радиохимически чистом виде. К преимуществам ^{228}Ac , выделяемого из

^{228}Ra , относятся долгий срок жизни материнского нуклида ($T_{1/2} = 5.7$ лет) и отсутствие долгоживущих дочерних нуклидов. Активность ^{228}Ra , находящегося в вековом равновесии с ^{232}Th , составляет около 1.6 кБк на 1 г нитрата тория, поэтому, выделяя ^{228}Ra из граммовых количеств нитрата тория, можно ежедневно извлекать из генератора ^{228}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 ^{228}Ra и ^{232}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 ^{232}Th или следовые количества ^{229}Th . В то же время в лите-

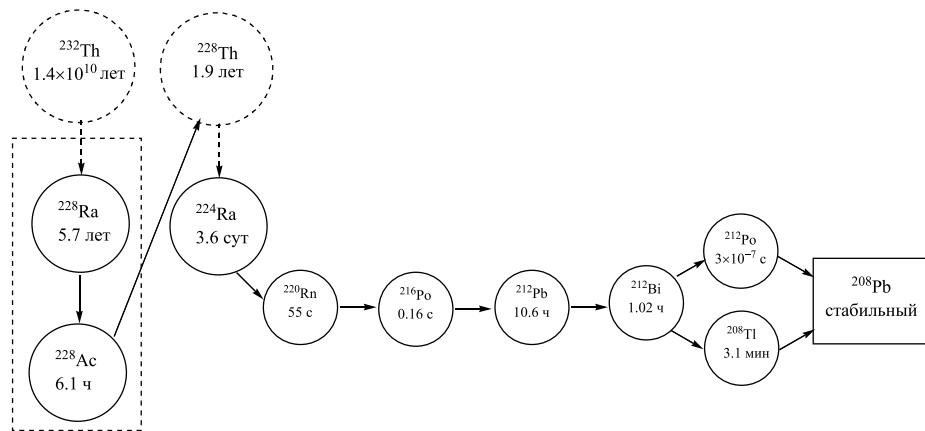


Рис. 1. Ряд распада ^{232}Th , содержащий генераторную пару $^{228}\text{Ra}/^{228}\text{Ac}$

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

В исследованиях возможности адресной доставки актиния изучена сорбция ^{225}Ac на различных носителях в составе радиофармпрепараторов. Так, показана возможность применения липосомальных носителей [11–14] или наночастиц на основе неорганических веществ – LaPO_4 [15–19], InPO_4 [20], GdVO_4 [21] и 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}Ac как продукта распада ^{228}Ra из природного тория с их последующим разделением и использование выделяемого ^{228}Ac в радиохимически чистом состоянии для исследований сорбции актиния на образцах УН различных структуры и физико-химических свойств.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Разработка методики выделения радиохимически чистого ^{228}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}Ac проходило в несколько стадий; на первой стадии достигается отделение макроподколичеств ^{232}Th и накопившегося ^{228}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 HNO_3 . Выбор экстрагента обусловлен проведенными ранее исследованиями [4], где было установлено, что лучшим экстрагентом из изученных для отделения ^{232}Th от продуктов, образующихся при его облучении протонами высоких энергий (а также радия и актиния), является Д2ЭГФК, которая экстрагирует ^{232}Th из азотнокислых растворов в широком диапазоне концентраций 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}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 HNO_3 , при этом радий и актиний не удерживаются на нем при концентрациях HNO_3 выше 0.2 М [28].

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

смесь выдерживали 1 месяц до полного распада ^{224}Ra . На заключительной стадии ^{228}Ac отделяли от ^{228}Ra , ^{208}Pb и вновь образующегося ^{228}Th . Для этого раствор ^{228}Ra в HNO_3 упаривали досуха в стеклянном флаконе на электроплитке; растворяли в 4 М 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}Ra и ^{228}Ac проводили путем селективного элюирования с колонки: сначала элюировали ^{228}Ra раствором 4 М HNO_3 , затем ^{228}Ac – в 0.05 М HNO_3 , собирая фракции объемом 1 мл каждая. Чистоту ^{228}Ac определяли путем регистрации его гамма-спектра в течение 3 сут. Для проведения экспериментов по сорбции актиния на УН элюат ^{228}Ac в среде 0.05 М HNO_3 упаривали досуха, растворяли в нескольких миллилитрах фосфатно-солевого буфера (ФБ) с pH 7.

Гамма-спектрометрия. Содержание тория, радия и актиния в образцах определяли методом гамма-спектрометрии при использовании спектрометра с детектором из высокочистого герmania GR 3818 (Canberra Ind, США). Торий идентифицировали по гамма-линии ^{228}Th с энергией 84.4 кэВ. Содержание ^{228}Ra в образцах определяли по дополнительно введенному гамма-излучающему ^{226}Ra (186 кэВ, 3.6%), полученному при растворении $^{226}\text{RaBr}_2$ в 0.01 М HCl . ^{228}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 УДАТАН (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 связанный плазмой (ИСП-МС) (X Series 2, Thermo Scientific, США). Элементный состав поверхности УН определяли методом рентгеновской фотоэлектронной спектрометрии (РФЭС) (Kratos Axis Ultra DLD, Kratos Analytical, Великобритания).

британия). Гидродинамический диаметр частиц УН в гидрозолях 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 Ar с 10% H_2 при 800°C в течение 5 ч.

Исследование сорбционного поведения ^{228}Ac на УН. При изучении сорбции $\text{Ac}(\text{III})$ на УН в полипропиленовые пробирки с крышкой помещали 100 мкл суспензии УН (1 г/л), добавляли 900 мкл полученного раствора ^{228}Ac . Пробирки встраивали 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}Ac , сравнивали скорость счета аликовты 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 полученному 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}Ac из природного тория. Показано, что $^{228,232}\text{Th}$ извлекается Д2ЭГФК из раствора 4 М HNO_3 практически количественно (99%), а ^{228}Ra при этом не экстрагируется. Дополнительную очистку остающегося в водного фазе ^{228}Ra от тория осуществляли при пропускании через колонку с экстракционно-хроматографическим сорбентом LN; при этом в элюате содержится 99.9% ^{228}Ra и не более 0.01% $^{228,232}\text{Th}$. Разделение ^{228}Ra и ^{228}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}Ra , а 13–16 мл – ^{228}Ac . Скорость течения элюата составила 1 мл/мин, что позво-

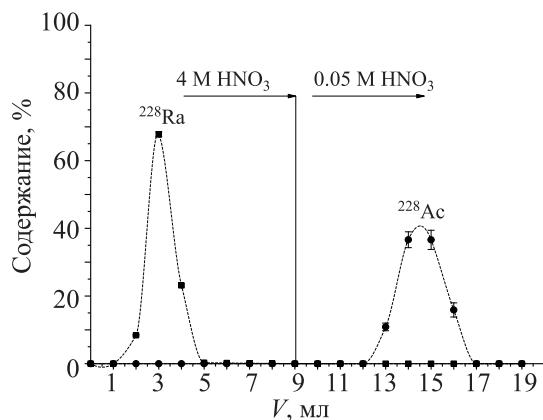


Рис. 2. Экстракционно-хроматографическое разделение ^{228}Ra и ^{228}Ac на сорбенте RE в среде HNO_3 . Объем колонки 2 мл, диаметр 0.7 см.

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

Установлено, что при реализации разработанного метода потери ^{228}Ra составляют не более 0.005% от помещенного на колонку, поэтому исходный препарат ^{228}Ra можно использовать многократно. Для этого фракции с 1 по 9 мл (рис. 2) упаривали и снова растворяли в 1 мл 4 М HNO_3 . Показана воспроизводимость результатов, так как из созданного генератора удалось элюировать ^{228}Ac не менее 20 раз. При длительном использовании раствора ^{228}Ra происходит накопление ^{228}Th за счет распада ^{228}Ac , но ^{228}Th по разработанной методике количественно сорбируется на колонке RE в процессе разделения ^{228}Ra и ^{228}Ac [31]. Колонки с сорбентом предполагаются для одноразового применения, поэтому ^{228}Th не загрязняет приготавливаемый раствор ^{228}Ac . При многолетнем использовании генератора экстракт ^{232}Th можно повторно использовать для извлечения накопившегося в нем ^{228}Ra .

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

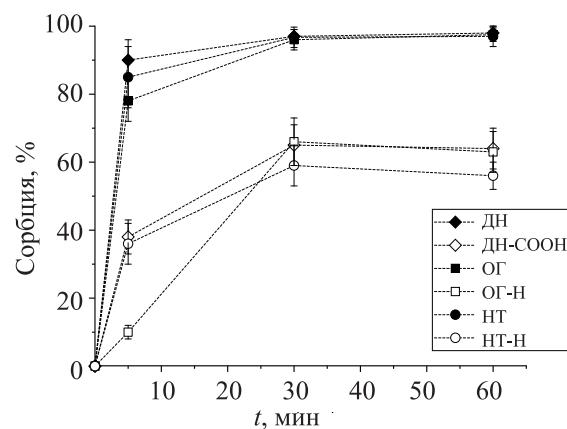


Рис. 3. Кинетика сорбции $\text{Ac}(\text{III})$ на УН в ФБ при 25°C , отношение m/V 100 мкг/мл.

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 $\text{м}^2/\text{г}$ 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 мкмоль/г).

Изучение сорбции ^{228}Ac на УН. Изучена кинетика сорбции ^{228}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 $\text{Ac}(\text{III})@\text{УН}$ *in vivo*.

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

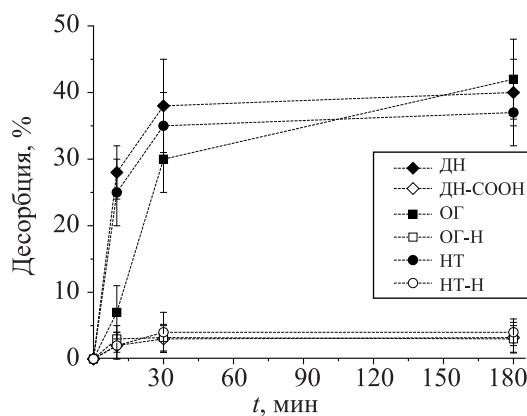


Рис. 4. Кинетика десорбции Ac(III) с УН в растворе БСА (40 г/л) в ФБ при 25°C, отношение m/V 100 мкг/мл.

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}Ac с образ-

зов ДН-СООН, ОГ-Н и НТ-Н в тех же условиях не превышает 5% за 3 ч. Изменение поведения Ac(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 Ac(III) на коммерческом образце ДН, вероятно, осуществляется по двух механизмам – прочному химическому связыванию ^{228}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 оказывается 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}Ac на этих образцах. Что касается взаимодействия ^{228}Ac с НТ,

Результаты характеризации образцов УН

Коммерческие образцы УН			
Характеристики	ДН	ОГ	НТ
Размер частиц исходных образцов по данным ПЭМ-ВР, нм	3–10	Нанолисты – 2 Листы $> 10^2$	Длина $> 2 \times 10^4$ Диаметр – 30 Толщина стенки 5–10
Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$	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_{sp^3} – 92.3% O – 7.7% N – 1.0%	C_{sp^2} – 77.4% C_{sp^3} – 7.9% O – 14.7%	C_{sp^2} – 99.0% O – 1.0%
Размер частиц и их агрегатов в гидрозолях, нм	100	Нанолисты – 2 Листы ^a	a
Количество групп –СООН по данным титрования, мкмоль/г	330	–	–
Модифицированные образцы УН			
Характеристики	ДН-СООН	ОГ-Н	НТ-Н
Количество групп –СООН по данным титрования, мкмоль/г	990	–	–
Размер частиц и их агрегатов в гидрозолях, нм	95	200 и 700	150 и 650
Элементный состав поверхности по данным РФЭС	C_{sp^3} – 88.7% O – 9.9% N – 1.4%	C_{sp^2} – 72.3% C_{sp^3} – 24.6% O – 3.1%	C_{sp^2} – 99.4% O – 0.6%

^a 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 количества 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

1. Blower P.J. // Dalton Trans. 2015. Vol. 44, N 11. P. 4819.
2. 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.
3. Garashchenko B.L., Korsakova V.A., Yakovlev R.Y. // Phys. At. Nucl. 2018. Vol. 81, N 10. P. 1515.
4. Aliev 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.
5. Havelka M. // Appl. Radiat. Isot. 2016. Vol. 109. P. 222.
6. Apostolidis C., Molinet R., Rasmussen G., Morgenstern A. // Anal. Chem. 2005. Vol. 77, N 19. P. 6288.
7. Bhatki K.S., Adloff J.P. // Radiochim. Acta. 1964. Vol. 3, N 3. P. 59.
8. Sekine T., Koike Y., Sakairi M. // J. Nucl. Sci. Technol. 1967. Vol. 4, N 6. P. 3081.
9. Włodzimirska B., Barto B., Bilewicz A. // Radiochim. Acta. 2003. Vol. 91. P. 553.
10. Zielinska B., Apostolidis C., Bruchertseifer F., Morgenstern A. // Solvent Extr. Ion Exch. 2007. Vol. 25, N 3. P. 339.
11. Change M.Y., Seideman J., Sofou S. // Bioconjug. Chem. 2008. Vol. 19, N 6. P. 12742.
12. Sempkowski M., Zhu C., Menzenski M.Z., Kevrekidis I.G., Bruchertseifer F., Morgenstern A., Sofou S. // Langmuir. 2016. Vol. 32, N 33. P. 83298.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. Toro-González M., Copping R., Mirzadeh S., Rojas J.V. // J. Mater. Chem. B. 2018. Vol. 6, N 47. P. 7985.
22. Cędrowska E., Pruszynski M., Majkowska-Pilip A., Męczyńska-Wielgosz S., Bruchertseifer F., Morgenstern A., Bilewicz A. // J. Nanoparticle Res. 2018. Vol. 20, N 3. Art. 83.
23. Zhang S., Yang K., Feng L., Liu Z. // Carbon. 2011. Vol. 49, N 12. P. 4040.
24. Rosenblat 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.
25. Zamani A.A., Yaftean M.R. // Sep. Purif. Technol. 2004. Vol. 40, N 2. P. 115.
26. El-Sweify F.H., Abdel-Fattah A.A., Ali S.M. // J. Chem. Thermodyn. 2008. Vol. 40, N 5. P. 798.
27. Gao S., Sun T., Chen Q., Shen X. // Radiochim. Acta. 2016. Vol. 104, N 7. P. 457.
28. McAlister D.R., Horwitz P.E. // Solvent Extr. Ion Exch. 2007. Vol. 25, N 6. P. 757.
29. Lisichkin G.V., Kulakova I.I., Gerasimov Y.A., Karpukhin A.V., Yakovlev R.Y. // Mendeleev Commun. 2009. Vol. 19, N 6. P. 309.
30. 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.
31. Dietz M.L., Horwitz E.P. // Int. J. Radiat. Appl. Instrum. Part. 1992. Vol. 43, N 9. P. 1093.
32. Tan X.L., Xu D., Chen C.L., Wang X.K., Hu W.P. // Radiochim. Acta. 2008. Vol. 96, N 1. P. 23.