

УДК 544.582.3:546.11.027*3+621.355.9

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОМЕЧЕНОГО ОКСИДА ГРАФЕНА С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА ТЕРМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ТРИТИЯ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В БЕТА-ВОЛЬТАИЧЕСКОМ ЭЛЕМЕНТЕ ЯДЕРНОЙ БАТАРЕИ

© 2024 г. Г. А. Бадун^{*а}, В. А. Буняев^{а, б}, М. Г. Чернышева^а^аХимический факультет Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 3^бИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, 119991, Москва, ул. Косыгина, д. 19

*e-mail: badunga@my.msu.ru

Получена 30.01.2024, после доработки 27.02.2024, принята к публикации 04.03.2024

Показана возможность введения трития в оксид графена (ОГ) методом термической активации. Установлено, что для получения максимально высокой удельной активности необходимо обрабатывать атомами трития тонкие пленки ОГ толщиной 5.6 мг/м². Показано, что эксперимент при 77 К имеет ряд преимуществ. При обработке ОГ атомами трития при 77 К была достигнута удельная активность [³H]ОГ 2.6 Ки/мг при расчете на массу исходного ОГ (0.7 Ки/мг после удаления лабильного трития). Удельное энерговыделение у [³H]ОГ с такой удельной активностью составляет 22.3 Вт/кг, что вполне достаточно для его использования в качестве компонента атомной батареи.

Ключевые слова: тритий, оксид графена, бета-вольтаическая батарея, метод термической активации трития.

DOI: 10.31857/S0033831124020074

Ядерная батарея, в состав которой входит бета-вольтаический элемент, состоящий из радиоактивного источника и полупроводникового материала, преобразовывающего энергию бета-частиц в электричество, привлекает значительный интерес благодаря своей способности обеспечивать стабильную работоспособность длительное время [1, 2]. Такие устройства имеют небольшой размер и массу и благодаря этому могут быть использованы в различных микроэнергетических устройствах [3].

Есть несколько радионуклидов, которые могут быть использованы в производстве бета-вольтаических батарей. Они должны иметь определенные ядерно-физические и химические свойства: (1) период полураспада радионуклида 10–100 лет для обеспечения длительного срока службы батареи; (2) энергию бета-частиц ниже порога образования дефектов в полупроводниковых преобразователях; (3) отсутствие побочного гамма-излучения; (4) возможность введения радионуклида в твердые материалы с обеспечением надежного контакта с полупроводником — преобразователем энергии.

⁶³Ni и ³H являются наиболее перспективными радионуклидами с этой точки зрения [2, 4–9]. Оба радионуклида испускают только β[–]-частицы с максимальной энергией 18.6 и 66.7 кэВ для трития и ⁶³Ni соответственно. Периоды полураспада (12.3 лет

третий, 100 лет ⁶³Ni) обеспечивают высокую удельную активность меченого материала и возможность длительной работы. Важным фактором, приводящим к высокой стоимости ⁶³Ni, является процесс его производства, который включает длительное (несколько лет) облучение в ядерном реакторе никеля, обогащенного ⁶²Ni, с последующим дополнительным обогащением ⁶³Ni в облученном материале [10].

Тритий также получают в ядерном реакторе при облучении нейтронами лития, но его можно легко высвободить из мишени и отделить от гелия. Таким образом, тритий значительно дешевле других бета-вольтаических радионуклидов, применяемых в энергетике. Однако тритий при нормальных условиях является газом, что приводит к ограничениям в применении. Заполнение микропористой трехмерной структуры газообразным тритием для повышения эффективности его использования рассматривалось ранее [5].

Введение трития непосредственно в состав твердого материала является другим способом повышения его концентрации. Для этого можно использовать тритиды металлов и интерметаллические соединения, в частности Ti[³H]N₂ [11–13]. Удельное выделение энергии тритидом титана, рассчитанное исходя из содержания трития и энергии его β-частиц, составляет около 36 Вт/кг. В то же время

можно рассмотреть и другие материалы с высоким содержанием трития и низким атомным номером, что также важно для эффективной передачи энергии излучения от радионуклида к полупроводнику. В настоящем исследовании мы предлагаем использовать оксид графена (ОГ) или восстановленный ОГ, в котором тритий ковалентно связан с углеродом.

Оксид графена не имеет точной структуры, но известно, что в его состав входят эпоксидные, гидроксильные, кетонные и карбоксильные группы [14]. Такой состав обеспечивает возможность введения значительного количества трития в ОГ путем изотопного обмена или путем образования восстановленной формы [15, 16]. Введение трития может быть осуществлено с помощью метода термической активации трития [15]. Введение трития в оксид графена интересен еще и тем, что графен-кремниевые диоды Шоттки уже изготовлены [17]. Более того, Амирмазлагани и соавт. предложили использовать уменьшенный гетеропереход ОГ–кремний для бета-вольтаических батарей с ^{63}Ni [17]. Таким образом, сочетание физических и химических свойств оксида графена и введенного в него трития позволяет рассматривать самые различные технические решения его использования.

Целью данной работы является поиск условий получения меченного тритием ОГ с максимальной высокой удельной активностью, чтобы энерговыделение было достаточным для создания атомной батареи на основе этого материала.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы

Использовали однослойный оксид графена (ChearTubes Inc., США) с удельной площадью поверхности $60 \text{ м}^2/\text{г}$, что было подтверждено методом низкотемпературной адсорбции–десорбции азота по стандартной методике метода Брунауэра–Эммета–Теллера (BET). ОГ суспендировали в воде, очищенной с помощью системы Milli-Q Millipore. Для введения трития в состав ОГ использовали смеси трития с водородом, очищенные через палладиевый фильтр. Использовали также кремниевые пластинки, на которые наносили титан слоем 300 нм с помощью магнетронного распыления [18, 19].

Активность меченых препаратов измеряли с помощью жидкостного сцинтилляционного спектрометра RackBeta 1215 с использованием жидкого сцинтиллятора OptiPhase HiSafe3. Для исключения неполной регистрации трития в составе ОГ к водной суспензии меченых препаратов ОГ добавляли 70%-ную азотную кислоту и нагревали в колбочке с обратным холодильником до температуры кипения в течение 3 ч. В предварительных экспериментах было показано, что при такой обработке практически весь тритий переходит в форму тритиевой воды.

Обработка ОГ атомарным тритием

Использовали два способа подготовки ОГ к введению трития. В первом способе 0.55 мл водной суспензии ОГ с концентрацией 0.182 г/л (0.10 мг ОГ) равномерно распределяли на стенках реакционного сосуда, замораживали и удаляли воду лиофилизацией. Во втором способе 30 мкл суспензии ОГ в воде с концентрацией 2 г/л (0.06 мг ОГ) наносили на пластины Si/Ti с площадью поверхности, равной 0.64 см^2 , и сушили на воздухе. Далее пластины располагали в реакционном сосуде возле боковой стенки примерно на расстоянии 3 см от вольфрамовой проволоки с помощью держателей, сделанных из алюминиевой фольги.

Реакционный сосуд вакуумировали с помощью специальной вакуумной установки для работы с газообразным тритием до остаточного давления $<0.01 \text{ Па}$. Затем реакционный сосуд заполняли тритием до давления 0.5 или 1.5 Па . Давление 0.5 Па использовали в экспериментах, когда весь реакционный сосуд охлаждали до 77 К жидким азотом. Если эксперимент проводили в условиях, когда ОГ оставался при комнатной температуре ($293\text{--}295 \text{ К}$), жидким азотом охлаждали только доннышко реакционного сосуда. Образование атомарного трития инициировали нагреванием вольфрамовой проволоки электрическим током до 2000 К в течение $20\text{--}60 \text{ с}$, остаточный газ удаляли, наполняли новой порцией и повторяли атомизацию. Использовали следующий режим обработки: 3 цикла нагревания вольфрамовой проволоки по 20 с , 2 цикла по 30 с и далее по 60 с .

После завершения обработки атомами трития ОГ смывали со стенок реакционного сосуда смесью вода–этанол $1 : 1$ по объему, используя ультразвуковую обработку. Полученные суспензии выдерживали 1 сут при температуре 4°C , упаривали досуха на ротационном испарителе и ресуспендировали в воде. Далее смешивали водную суспензию с 70%-ной азотной кислотой в соотношении $2 : 3$ по объему. Перед измерением активности суспензий проводили нагревание до кипения смеси в течение 3 ч с обратным холодильником. Кремниевые пластинки с нанесенным ОГ помещали сразу в 5 мл 70%-ного раствора азотной кислоты.

Было также показано, что тритий не внедряется в слой титана, нанесенного на кремниевую пластинку, в условиях указанной выше обработки, вероятно, из-за образования поверхностного слоя оксида.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Метод термической активации является простым и удобным способом генерации атомов трития [20]. С его помощью можно заместить водород на тритий в органических молекулах, а также провести модификацию вещества восстановлением функциональных групп и гидрированием кратных связей, что приведет к прочному связыванию трития в составе

молекулы. Хотя ОГ представляет собой соединение переменного состава, и количество функциональных групп зависит от метода синтеза [21, 22], для интерпретации результатов работы рассматривали гипотетический структурный элемент (брутто-формула $C_{77}H_{42}O_{37}$, молекулярная масса 1558 г/моль), представленный на рис. 1, который соответствует свойствам использованного нами препарата [16].

При интерпретации результатов рассматривали два параметра, характеризующие взаимодействие атомарного трития с ОГ:

(1) общая активность связавшегося с ОГ трития (A_0), которая включала как прочно связанный тритий (связи $C-^3H$), так и тритий в обменных положениях ($O-^3H$), а также образующуюся тритиевую воду;

(2) удельная активность ОГ после удаления тритиевой воды и трития их лабильных положений (A_1).

В эксперименте при 77 К образующаяся тритиевая вода оставалась в составе мишени. В эксперименте при 295 К тритиевая вода конденсировалась на дне реакционного сосуда, и ее активность измеряли отдельно.

Рассчитывали общую удельную активность материала ($A_{уд.0}$) и удельную активность материала после удаления лабильного трития ($A_{уд.1}$). В этих расчетах пренебрегали потерями материала при его извлечении из реакционного сосуда, но учитывали увеличение его массы за счет замены 1H на 3H . При высокой

степени замещения водорода на тритий поправка может быть существенной. Например, при введении 0.3 Ки трития в 0.1 мг ОГ удельная активность формально составляла 3 Ки/г исходного ОГ [23]. Однако 0.3 Ки (0.01 ммоль трития) при изотопном замещении водорода дает прибавку в массе 0.02 мг. При восстановлении кислородсодержащих групп, если образующаяся вода остается в составе материала (эксперимент при 77 К), прибавке в массе составляет 0.03 мг.

Если весь водород в ОГ заместить на тритий, то удельная активность препарата, структурный фрагмент которого представлен на рис. 1, составит 0.78 Ки/мг для исходной массы ОГ и 0.74 Ки/мг с учетом увеличения массы препарата за счет замещения водорода на тритий. Благодаря восстановлению кислородсодержащих групп в реакции с атомарным тритием возрастает доля трития, ковалентно связанного с ОГ по связям $C-^3H$. Если образующаяся при этом тритиевая вода останется в составе ОГ, то удельная активность препарата также будет расти. Известно, что ОГ хорошо сорбирует воду — до 0.56 г на 1 г вещества (до 52 молекул воды на рассматриваемый структурный фрагмент) [24]. При связывании такого количества тритиевой воды удельная активность материала достигнет величины 1.09 Ки/мг с учетом массы тритиевой воды или 1.86 Ки/мг, если исходить из массы исходного ОГ. Если провести реакцию с атомарным тритием, то при замещении всего водорода на тритий и связывании тритиевой воды как продукта реакции в самом материале удельная активность составит 1.50 Ки/мг с учетом увеличения массы материала или 2.64 Ки/мг в пересчете на исходную массу ОГ.

В данной работе использовали два типа мишеней для введения в них трития: 1) ОГ, нанесенный непосредственно на кремниевую пластину — элемент устройства для дальнейшего преобразования энергии излучения трития в атомной батарее; 2) ОГ, нанесенный тонким слоем на стенки реакционного сосуда. Во втором случае после введения трития потребуется затем перенести его на поверхность полупроводникового преобразователя.

Так как пробег β -излучения трития в веществе органичен из-за низкой энергии излучения, толщина слоя ОГ, нанесенного на кремниевую пластину, должна составлять не более 1 г/м². Поэтому в экспериментах с нанесением ОГ на кремниевые пластинки получали слои толщиной 0.94 г/м².

При использовании метода термической активации также надо учитывать, что глубина проникновения реакционных атомов трития в твердое тело зависит от свойств исследуемого объекта и условий проведения реакции [25] $C_{14}H_{29}$, $C_{16}H_{33}$. Поэтому в экспериментах с нанесением ОГ на стенки реакционного сосуда получали покрытие толщиной 5.6 мг/м².

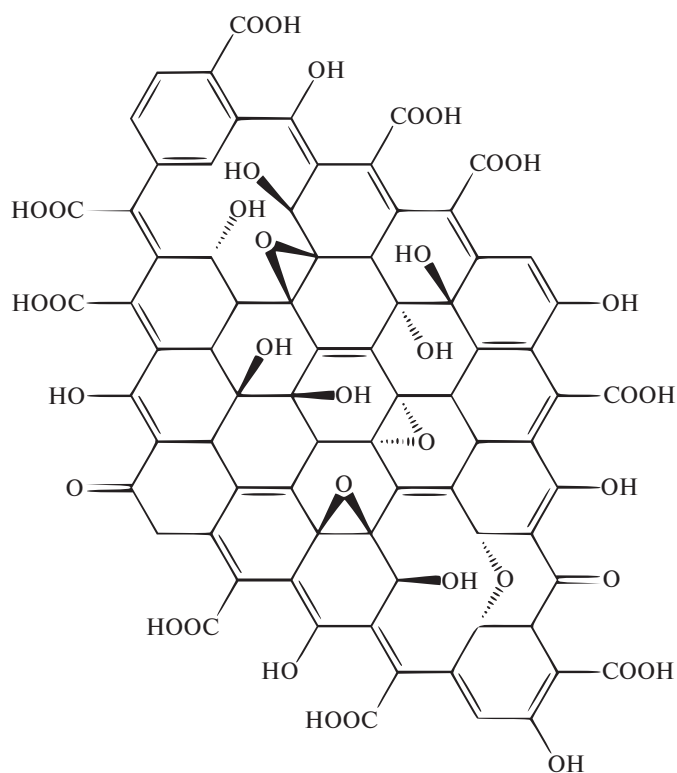


Рис. 1. Типичный структурный фрагмент ОГ.

При обработке атомами трития ОГ, нанесенного на кремниевую пластинку, площадь поверхности мишени была небольшая (0.64 см^2), и активность ОГ была существенно меньше, чем при нанесении вещества на стенки реакционного сосуда (геометрическая площадь поверхности 180 см^2). Однако удельная поверхностная активность (мКи/см^2) оказалась близкой по величине для двух способов нанесения. На рис. 2 представлены зависимости изменения активности ОГ, нанесенного на кремниевую пластинку (1) и стенки сосуда (2), при увеличении времени обработки атомарным тритием при комнатной температуре мишени. Необходимо иметь ввиду, что здесь указана активность ОГ без учета тритиевой воды, конденсировавшейся на дне реакционного сосуда, которую в случае нанесения ОГ на кремниевые пластины не собирали.

Для ОГ, нанесенного на кремниевые пластины, тенденция увеличения активности при увеличении продолжительности обработки атомами трития в целом выполнялась, хотя иногда наблюдались существенные расхождения с данными, полученными для ОГ, нанесенного на стенки сосуда. Вероятно, здесь сказываются технические трудности при подготовке препарата к введению трития, что приводит к ухудшению воспроизводимости. Главный вывод заключается в том, что ОГ образует плотный слой вещества, который мало проницаем для атомарного трития. Поэтому при нанесении ОГ на кремниевые пластинки слоем толщиной 0.94 г/м^2 в реакцию вступает только поверхностная часть мишени, и удельная активность ОГ недостаточна для применения в ядерной батарее.

Поэтому для достижения предельно высокой удельной активности гораздо эффективнее оказалось наносить ОГ на стенки реакционного сосуда с получением покрытия толщиной около 5.6 мг/м^2 . Для поиска оптимальных условий рассмотрели два

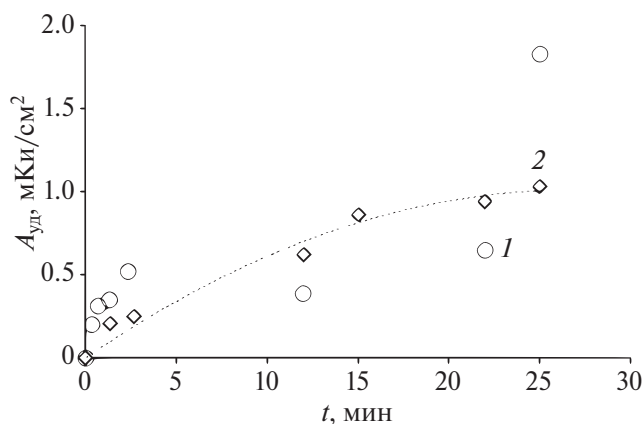


Рис. 2. Зависимость поверхностной удельной активности ОГ, нанесенного на кремниевые пластинки, толщина слоя 0.94 г/м^2 (1), и стенки реакционного сосуда, толщина слоя 0.0056 г/м^2 (2), от времени обработки атомами трития при комнатной температуре.

температурных режима для мишени: 77 и 295 К. На рис. 3 и 4 представлены зависимости изменения общей активности ОГ (A_0) и активности ОГ после удаления лабильного трития (A_1) с увеличением времени обработки.

Увеличение продолжительности обработки ОГ атомарным тритием приводило к росту активности ОГ (A_0) практически линейно как при 77, так и 295 К. В эксперименте при 77 К весь тритий содержался в составе ОГ, и его удельная активность достигла 2.6 Ки/мг при расчете на массу исходного ОГ (1.5 Ки/мг с учетом увеличения массы мишени) при продолжительности обработки 16 мин.

В эксперименте при комнатной температуре мишени ОГ тритиевая вода собиралась в охлаждаемой жидким азотом части реакционного сосуда, и ее активность составляла около 40% от общей активности препарата. Суммарная активность трития, собранного в реакционном сосуде ($[^3\text{H}]\text{ОГ} + \text{тритиевая вода}$)

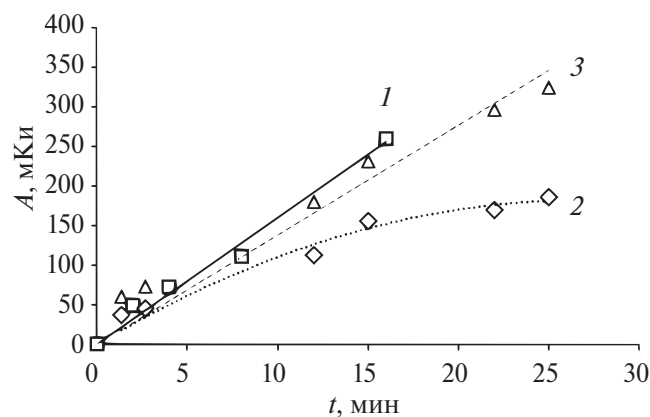


Рис. 3. Зависимость активности ОГ от времени обработки атомами трития при 77 К (1), 295 К (2), а также суммы активности $[^3\text{H}]\text{ОГ}$ и тритиевой воды в эксперименте при 295 К (3).

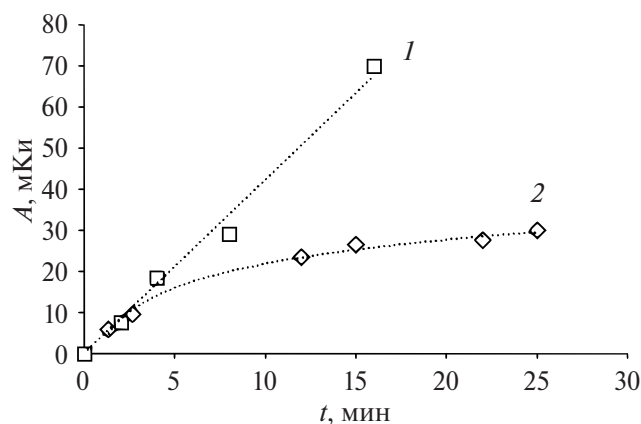


Рис. 4. Зависимость активности $[^3\text{H}]\text{ОГ}$ после удаления лабильной метки от времени обработки атомами трития при 77 К (1) и 295 К (2).

в эксперименте при 295 К, и активность трития, связанного с ОГ при 77 К, изменялись с увеличением времени эксперимента практически одинаково. Максимальная активность ОГ 1.8 Ки/г была достигнута при продолжительности обработки 25 мин. При добавке активности тритиевой воды, сконденсированной на дне сосуда, расчетная величина удельной активности без учета изменения массы препарата достигла 3.2 Ки/г.

После удаления лабильного трития активность ОГ оказалась выше в эксперименте при 77 К, причем сохранилась линейная зависимость от времени (рис. 4). Для экспериментов при комнатной температуре мишени линейность наблюдалась только при малых временах обработки (менее 3 мин), а далее рост замедлился и достиг величины 30 мКи при 25 мин обработки.

При температуре мишени 77 К и времени обработки 16 мин активность $[^3\text{H}]\text{ОГ}$ после удаления лабильной метки составила 70 мКи. То есть удельная активность 0.70 Ки/мг (0.66 Ки/мг с учетом замещения водорода на тритий) оказалась близкой к максимальной величине, рассчитанной из рассматриваемой структуры ОГ. Отсутствие насыщения ОГ тритием при обработке при 77 К может быть связано с тем, что при таком режиме обработки происходит дальнейшая модификация ОГ с образованием графена. Подтверждением этого явилась «гидрофобизация» ОГ: после воздействия атомарного трития препарат не удавалось диспергировать в воде с применением ультразвука. Извлечь меченный тритием материал из реакционного сосуда удалось только смесью воды с этанолом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе показано, что ОГ, содержащий в своем составе тритий, представляет собой материал, перспективный для применения в атомной батарее в качестве источника мягкого бета-излучения, которое не приведет к радиационному повреждению материала. Преимущество ОГ перед другими материалами заключается в небольшом среднем атомном номере, относительно низкой плотности, возможности достижения высокого содержания трития, химической и радиационной стойкости.

ОГ является хорошей альтернативой гидриду титана (TiH_2), который рассматривается как один из подходящих материалов для атомной батареи [26]. При полном замещении водорода на тритий в гидриде титана можно достичь содержания трития 0.037 моль/г и удельной активности 1.07 Ки/мг. Однако для получения такой удельной активности требуется работа с газообразным тритием при высоком давлении и температуре, что технически трудно. Предложенный в данной работе подход позволяет насыщать ОГ тритием при пониженном давлении газа и охлаждении стенок реакционного сосуда.

Если удерживать образующуюся тритиевую воду в составе материала, то удельная активность $[^3\text{H}]\text{ОГ}$ будет даже выше, чем у тритида титана. Удобнее работать с материалом, который содержит тритий, ковалентно связанный с углеродом, поэтому будет прочно удерживаться в его составе без использования защитных покрытий. В этом случае удельная активность 0.7 Ки/мг оказывается ниже, чем у Ti^3H_2 , однако удельное энерговыделение 22.3 Вт/кг вполне достаточно для использования $[^3\text{H}]\text{ОГ}$ в качестве компонента атомной батареи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках Госзадания № 122030200324-1 «Решение задач ядерной энергетики и безопасности окружающей среды, а также диагностики материалов с использованием ионизирующих излучений».

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krasnov A.A., Legotin S.A. // Instrum. Exp. Tech. 2020. Vol. 63. P. 437–452.
2. Wagner D.L., Novog D.R., Lapierre R.R. // J. Appl. Phys. 2020. Vol. 127. Article 244303.
3. Zhou C., Zhang J., Wang X., Yang Y., Xu P., Li P. et al. // ECS J. Solid State Sci. Technol. 2021. Vol. 10. Article 027005.
4. Ershova N.A., Krasnov A.A., Legotin S.A., Rogozev B.I., Murashev V.N. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. YEAR? Vol. 950. Article 012007.
5. Sun W., Kherani N.P., Hirschman K.D., Gadeken L.L., Fauchet P.M. // Adv. Mater. 2005. Vol. 17. P. 1230–1233.
6. Chang Y., Chen C., Liu P., Zhang J. // Sensors Actuators A Phys. 2014. Vol. 215. P. 17–21.
7. Bormashov V.S., Troschiev S.Y., Tarelkin S.A., Volkov A.P., Teteruk D.V., Golovanov A.V. et al. // Diam. Relat. Mater. 2018. Vol. 84. P. 41–47.
8. Цветков Л.А., Цветков С.Л., Пустовалов А.А., Вербейцкий В.Н., Баранов Н.Н., Мандругин А.А. // Радиохимия. 2022. Т. 64. С. 281–288.
9. Кузнецов Р.А., Бобровская К.С., Белобров И.С., Тихончев М.Ю., Новиков С.Г., Жуков А.В. // Радиохимия. 2022. Т. 64. С. 289–296.
10. Sosnin L.J., Suvorov I.A., Tcheltsov A.N., Rogozev B.I., Gudov V.I. // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A. 1993. Vol. 334. P. 43–44.
11. Wu M., Wang S., Ou Y., Wang W. // Appl. Radiat. Isot. 2018. Vol. 142. P. 22–27.

12. Li H., Liu Y., Hu R., Yang Y., Wang G., Zhong Z., Luo S. // *Appl. Radiat. Isot.* 2012. Vol. 70. P. 2559–2563.
13. Lei Y., Yang Y., Liu Y., Li H., Wang G., Hu R. et al. // *Appl. Radiat. Isot.* 2014. Vol. 90. P. 165–169.
14. He H., Klinowski J., Forster M., Lerf A. // *Chem. Phys. Lett.* 1998. Vol. 287. P. 53–56.
15. Badun G.A., Chernysheva M.G., Grigorieva A.V., Eremina E.A., Egorov A.V. // *Radiochim. Acta.* 2016. Vol. 104. P. 593–599.
16. Bunyaev V.A., Chernysheva M.G., Popov A.G., Grigorieva A.V., Badun G.A. // *Fullerenes, Nanotub. Carbon Nanostruct.* 2020. Vol. 28. P. 191–195.
17. Amirmazlaghani M., Rajabi A., Pour-mohammadi Z., Sehat, A.A. // *Superlattices Microstruct.* 2020. Vol. 145. Article 106602.
18. Вербецкий В.Н., Митрохин С.В., Бадун Г.А., Евлашин С.А., Тепанов А.А., Буняев В.А. // *Материаловедение.* 2020. Т. 11. С. 8–11.
19. Khmel'nitsky R.A., Evtashin S.A., Martovitsky V.P., Pastchenko P.V., Dagesian S.A., Alekseev A.A. et al. // *Cryst. Growth Des.* 2016. Vol. 16. P. 1420–1427.
20. Бадун Г.А., Чернышева М.Г. // *Радиохимия.* 2023. Т. 65. С. 158–171.
21. Mouhat F., Coudert F.X., Bocquet M.L. // *Nat. Commun.* 2020. Vol. 11. Article 1566.
22. Feicht P., Eigler S. // *Chem. Nano Mat.* 2018. Vol. 4. P. 244–252.
23. Буняев В.А. Матер. Междунар. молодежного науч. форума «Ломоносов-2021»: Тез. докл. М., 12–13 апреля 2021 г. М.: МАКС Пресс, 2021. С. 783.
24. Lian B., De Luca S., You Y., Alwarappan S., Yoshimura M., Sahajwalla V. et al. // *Chem. Sci.* 2018. Vol. 9. P. 5106–5111.
25. Тясто З.А., Михалина Е.В., Чернышева М.Г., Бадун Г.А. // *Радиохимия.* 2007. Т. 49. С. 163–165.
26. Li X., Lu J., Zheng R., Wang Y., Xu X., Liu Y. // *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2020. Vol. 53. P. 1–6.

PREPARATION OF HIGH-LABELED GRAPHENE OXIDE BY TRITIUM THERMAL ACTIVATION METHOD FOR APPLICATION IN THE BETAVOLTAIC CELL OF A NUCLEAR BATTERY

G. A. Badun^{a, *}, V. A. Bunyaev^{a, b}, M. G. Chernysheva^a

^a*Faculty of Chemistry, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

^b*Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991 Russia*

^{*}*e-mail: badunga@my.msu.ru*

Received January 30, 2024; revised February 27, 2024; accepted March 4, 2024

Possibility of tritium introduction into graphene oxide (GO) by tritium thermal activation method was demonstrated. It has been established that, in order to obtain the highest possible specific radioactivity, thin films of GO with a thickness of 5.6 mg/m² must be treated with tritium atoms. The experiment provided at 77 K showed a number of advantages. Under these conditions, the specific activity of [³H]GO of 2.6 Ci/mg was reached when calculated by the mass of the initial GO (0.7 Ci/mg if purified to remove the labile tritium). Specific energy release in [³H]GO with such specific activity is 22.3 W/kg, which is enough for its application as a component of an atomic battery.

Keywords: tritium, graphene oxide, betavoltaic battery, tritium thermal activation method.