

ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЯ ФТОРИДА ГРАФЕНА 2-ФЕНИЛБЕНЗИМИДАЗОМ

© 2023 г. З. А. Матвеев¹, Б. Ч. Холхоев¹, В. Г. Макотченко², М. Н. Иванова²,
В. Е. Федоров², В. Ф. Бурдуковский^{1,*}

¹ Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук,
ул. Сахьяновой 6, Улан-Удэ, 670047 Россия

² Институт неорганической химии имени А. В. Николаева Сибирского отделения Российской академии наук,
Новосибирск, 630090 Россия
*e-mail: burdovit@mail.ru

Поступило в редакцию 24 марта 2023 г.
После доработки 27 июня 2023 г.
Принято к печати 28 июня 2023 г.

Взаимодействием фторида графена с 2-фенилбензимидазолом получен новый бензимидазол-функционализированный графеновый материал. Показано, что осуществление реакции в сульфолане в присутствии пиридина обеспечивает более высокую степень функционализации. Образование целевого продукта подтверждено данными элементного анализа, ИК и КР спектроскопии.

Ключевые слова: графен, фторид графена, 2-фенилбензимидазол

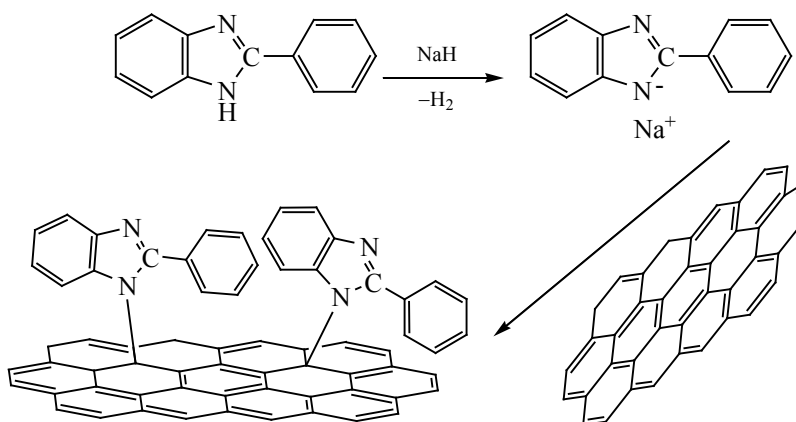
DOI: 10.31857/S0044460X23070016, **EDN:** HEIAQN

В последние годы, особенно после известных работ К.С. Новоселова и А.К. Гейма [1–3], исследования в области синтеза и свойств графена стали одной из самых широко обсуждаемых и быстро развивающихся тем в химии и физике, поскольку еще первые эксперименты с механически отщепленным графеном показали его необычную электронную структуру, высочайшую подвижность носителей заряда при комнатной температуре. Кроме того, для графена характерна высокая механическая прочность, гибкость, хорошая теплопроводность. Подобные свойства определили широкий круг его различных приложений, существенно расширить который можно за счет использования разнообразных производных графена, придавая или улучшая требуемую функциональность [4]. Например, в биомедицинских приложениях для лучшего связывания биологически активных, лекарственных веществ и клеток с поверхностью графена, необходимо получать его гидрофильные

производные с развитой удельной поверхностью [5]. Для этих целей обычно используют химически активные производные графена, среди которых самым распространенным является оксид графена, содержащий разнообразные реакционноспособные кислородсодержащие функциональные группы: гидроксильные и эпоксидные группы, обычно присоединенные медиально, карбоксильные и карбонильные группы, главным образом, находящиеся латерально [6]. Так, ранее, мы, используя оксид графена и 3,3',4,4'-тетрааминодифенилоксид, продемонстрировали возможность получения пористых трехмерных графеновых сеток с бензимидазольными фрагментами, перспективных для применения в электрохимических устройствах [7].

Продолжая исследования в этом направлении, представлялось весьма интересным осуществить прямое присоединение молекулы-допанта с бензимидазольным циклом к графену без использования оксид графена. Это непростая задача, по-

Схема 1.



сколькx для образования ковалентной связи между атомами С графена и N молекулы-допанта обычно используют высокореакционноспособный синглетный нитрен, участвующий в реакции циклоприсоединения к графену с образованием различных производных [8–10] или другое производное графена – фторированный графен [11–13].

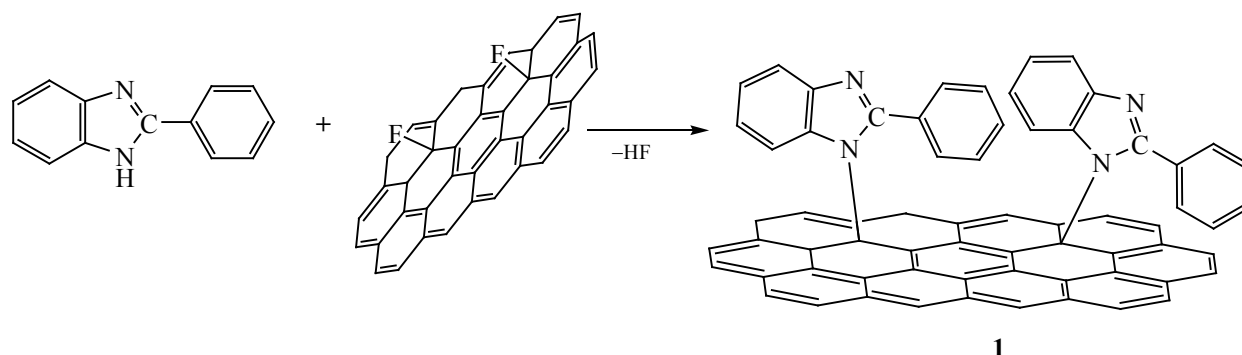
Простейший представитель, содержащий ароматическое кольцо у атома углерода бензимидазольного цикла – 2-фенилбензимидазол также способен придать графену дополнительную функциональность, поскольку обладает редокс-активностью, состоит из планарных циклов, сопряженных в общую ароматическую p - π -электронную систему, структурно схож с графеном, с которым может участвовать в π - π -взаимодействии. Более того, прививка объемной молекулы с гетероатомами, содержащими неподеленные пары электронов, обычно приводит к увеличению рельефности поверхности графена, смачиваемости, адсорбции ионов и т. п. [14].

Как известно, графен – неинертное соединение и может вступать в реакции по аналогии с ненасыщенными и/или ароматическими соединениями, а ковалентные взаимодействия с ним хорошо изучены для органических радикалов, электрофилов и диенофилов с образованием в основном новой связи С–С [14, 15]. Но, к сожалению, реакционные центры 2-фенилбензимидазола представляют собой имидазольные атомы азота, находящиеся в прототропном равновесии между собой, не соответствуют вышеуказанным и, более того,

нуклеофильны в результате активационного взаимодействия с гидридом натрия, что в принципе делает невозможным взаимодействие двух электрононасыщенных соединений. Однако в молекуле графена помимо атомов углерода в плоскости графенового листа, связанных друг с другом σ - и π -связями и не способных образовывать новую химическую связь, есть атомы углерода по краям монослоя у которых такая возможность есть, вследствие чего они уже более латентны не только к перечисленным выше соединениям. Более того, наличие в структуре реального графена дефектов приводит к повышенной химической активности углеродных атомов, расположенных вблизи них. Именно эти атомы первыми вступают в химические взаимодействия, а затем развитие реакций идет с участием соседних [15]. Эти обстоятельства предопределили возможность протекания химической реакции между 2-фенилбензимидазолом и графеном (схема 1).

В качестве графенового субстрата использовали малослойный графен, полученный термическим ударом интеркалированного графита, содержащий 10–15 слоев, в которых присутствуют дефекты в виде sp^3 -гибридизованных атомов углерода, пяти- и семичленных циклов, а в некоторых гексагональных ячейках графена отсутствуют атом(ы) углерода [16]. Также использовали восстановленный оксид графена – графен, полученный в ходе термического восстановления оксида графена, который по своей сути представляет графен, но из-за предшествующих интенсивных реакций

Схема 2.



окисления и восстановления, содержит большое количество дефектов.

Первоначально в инертной среде осуществляли реакцию полуторакратного избытка гидроксида натрия с 2-фенилбензимидазолом в растворе в N-метилпирролидоне с целью получения фенилбензимидазолят-аниона, обладающего высокой реакционной способностью [17, 18]. После его образования, что косвенно оценивали по завершению выделения водорода и интенсивно красному окрашиванию реакционного раствора, добавляли предварительно приготовленную дисперсию малослойного графена или восстановленного оксида графена. Дисперсию готовили в N-метилпирролидоне, в котором графен и его производные образуют концентрированные стабильные дисперсии при непродолжительной ультразвуковой обработке [19]. Далее реакционную смесь нагревали до 60°C и выдерживали в атмосфере аргона при постоянном перемешивании. К сожалению, проведение реакции даже в течение 72 ч, судя по данным элементного анализа, ИК и КР спектроскопии, не приводило к образованию целевого продукта, указывая, тем самым, на несостоятельность выдвинутого предположения.

Стало вполне очевидно, что в реакции с 2-фенилбензимидазолом необходимо использовать более активное производное графена, способное с ним вступать в химическое взаимодействие. Среди таковых наиболее интересным и противоречивым является фторид графена. Связь C–F довольно прочная (>100 ккал/моль), а фторид-ион не является хорошей уходящей группой в реакциях нуклеофильного замещения. Однако деформация, вызванная графеновым слоем, более чем в два раза ослабляет прочность связи, делая, тем самым, фто-

рид-ион уже хорошей уходящей группой и обеспечивая возможность протекания нуклеофильного замещения даже по мономолекулярному механизму в сильно полярных средах [11, 12, 20].

В работе использовали малослойный фторид графена, полученный фторированием малослойного графена [16]. Особенностью данного материала состава C_2F является увеличенное межплоскостное расстояние ($d \approx 6.3 \text{ \AA}$) и небольшое количество слоев (1–10), в связи, с чем облегчается процесс образования коллоидных дисперсий в ряде органических растворителей [16, 21], что важно для проведения химических превращений в растворе. Установлено, что гомогенные дисперсии образуются в спиртах и некоторых органических растворителях при ультразвуковой обработке в течение 5–60 мин. Наибольшие концентрации стабильных в течение длительного времени малослойных фторграфеновых частиц достигались при использовании изопропанола, *трет*-бутанола, толуола и сульфолана. При этом, в случае использования низших спиртов (метанол и этанол) образуются метастабильные дисперсии – осаждение крупных кристаллитов происходит в течение нескольких часов, что может являться следствием реакции нуклеофильного замещения между атомами фтора C_2F и гидроксильными группами спиртов. Необходимо отметить, что ультразвуковая обработка малослойного фторида графена в растворителях, обычно используемых для получения графеновых дисперсий (N-метилпирролидон, N,N-диметилформамид), не ведет к получению дисперсий C_2F . При добавлении указанных растворителей к малослойному фториду графена наблюдалось почернение и набухание образца, что может быть связано с их химическим взаимодействием [16].

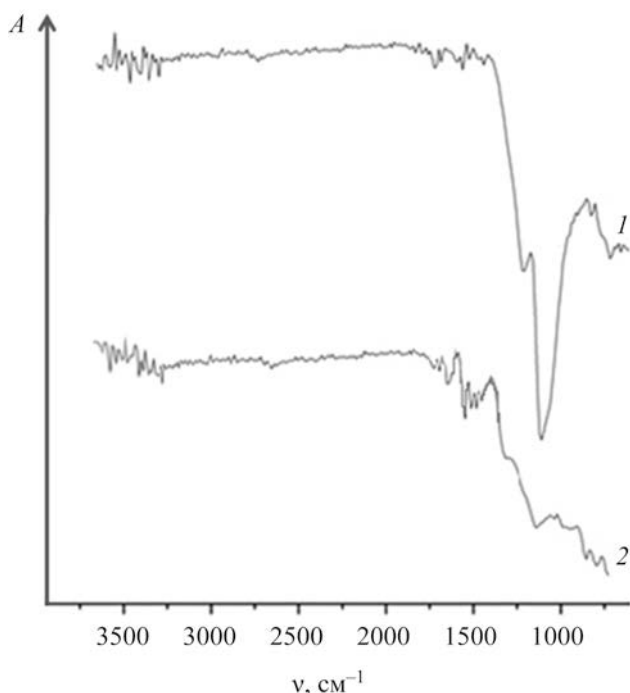


Рис. 1. ИК спектры малослойного фторида графена (1) и конъюгата 2-фенилбензимидазола с малослойным фторидом графена (2).

При выборе растворителя для получения дисперсии малослойного фторида графена также необходимо учитывать, что он будет оказывать значительное влияние на механизм протекания реакции. Так, в полярных средах предпочтительно протекание мономолекулярных реакций нуклеофильного замещения (S_N1), тогда как в неполярных бимолекулярных (S_N2). С учетом всего вышесказанного, дисперсии малослойного фторида графена готовили в двух максимально разнополярных растворителях: сульфолане и толуоле. Концентрация малослойного фторида графена в дисперсии составляла 1 мг/мл, к которому добавляли практически двукратный мольный избыток 2-фенилбензимидазола и проводили реакцию в инертной атмосфере при нагревании (схема 2).

2-Фенилбензимидазол, благодаря наличию двух неподеленных пар электронов на атомах азо-

та, обладает слабо выраженными нуклеофильными свойствами и способен атаковать электронодефицитный атом углерода, соединенный с фтором. Однако, как показали исследования, значительно повысить нуклеофильность 2-фенилбензимидазола можно за счет добавления в реакционную систему более сильного, чем 2-фенилбензимидазол основания, которое бы оттягивало протон бензимидазольного цикла с образованием более реакционноспособных производных. На эту роль были опробованы традиционные органические основания – триэтиламин, трибутиламин, однако, наилучшие результаты достигались при использовании пиридина. Применение такого подхода значительно облегчает замещение фторид-анионов малослойного фторида графена. Далее, в свою очередь, побочный продукт связывается пиридином с образованием солевой формы. Таким образом, пиридин является как катализатором, так и акцептором выделяющегося фтороводорода. Последнее обстоятельство также должно значительно влиять на степень функционализации целевого продукта. Изучение температурно-временного режима показало, что наибольшая модификация малослойного фторида графена как в толуоле, так и в сульфолане достигается при проведении синтеза при 80°C в течение 6–7 ч.

В ИК спектрах (рис. 1) продукта реакции 1 в отличие от исходного малослойного фторида графена наблюдаются характеристические полосы поглощения бензимидазольных циклов в области 1631–1640 cm^{-1} ($\text{C}=\text{N}$), а также происходит существенное уменьшение полосы при 1200–1300 cm^{-1} ($\text{C}-\text{F}$). В спектре КР малослойного фторида графена (рис. 2, кривая 1) присутствуют характерные для всех графеновых материалов G и D полосы при ~ 1625 и 1320 cm^{-1} соответственно [11]. В спектре модифицированного материала (рис. 2, кривая 3) наряду с указанными пиками присутствуют также полосы при ~ 1600, 1560, 1460, 1280 и 1000 cm^{-1} , которые характерны для 2-фенилбензимидазола (рис. 2, кривая 2).

По данным элементного анализа (табл. 1), содержание азота в полученных материалах достигает 6.03%, а содержание фтора уменьшается до 27.21%, что также подтверждает произошедшую реакцию. Вычисления, основанные на этих дан-

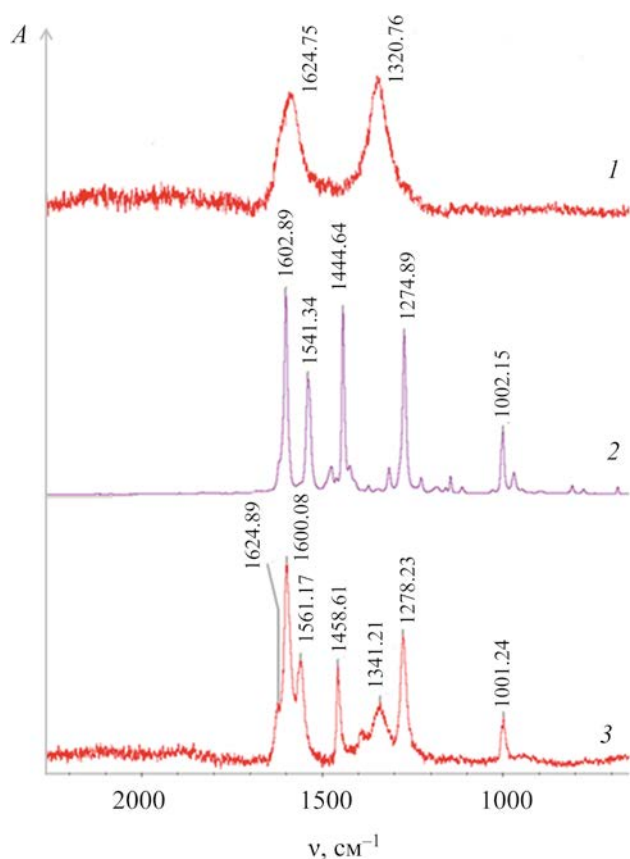


Рис. 2. Спектры КР малослойного фторида графена (1), 2-фенилбензимидазола (2) и конъюгата 2-фенилбензимидазола с малослойным фторидом графена (3).

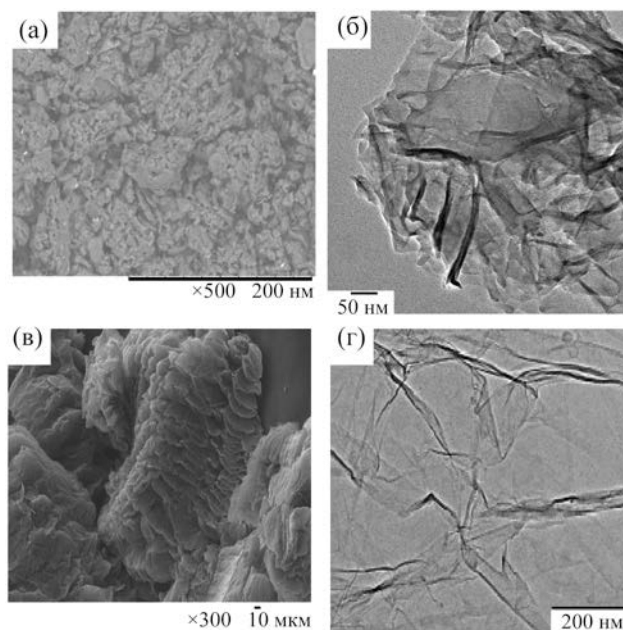


Рис. 3. Изображения СЭМ (а, в) и ПЭМ (б, г) конъюгата 2-фенилбензимидазола с малослойным фторидом графена (а, б) и 2-фенилбензимидазола (в, г).

ных, с некоторыми допущениями показывают, что примерно каждый шестой фрагмент C_2F связан с 2-фенилбензимидазолом, а степень замещения составляет около 16.67%. Важно отметить, что содержание азота в полученных материалах зависит от используемого растворителя. Так, при использовании толуола степень модификации (содержание азота) существенно ниже (3.89%), чем при использовании сульфолана (6.03%). Таким образом, очевидно, полярность растворителя оказывает су-

щественное влияние на механизм реакции и, как следствие, на выход продукта реакции **1**.

На рентгенограммах полученных конъюгатов 2-фенилбензимидазола с малослойным фторидом графена присутствует лишь широкое гало в области $11-25^\circ$ и отсутствует рефлекс при 26° , характерный для малослойного фторида графена. Данные наблюдения позволяют сделать вывод о том, что в результате ковалентной модификации удалось избежать рестекинга графеновых листов.

Таблица 1. Данные элементного анализа (мас%)

Образец	C	H	N	F
Малослойный фторид графена	55.82	—	0.0	40.63
2-Фенилбензимидазол–малослойный фторид графена-т	59.48	1.74	3.89	36.51
2-Фенилбензимидазол–малослойный фторид графена-с	63.75	3.01	6.03	27.21

Полученные материалы в отличие от исходного малослойного фторида графена способны образовывать более стабильные коллоидные дисперсии в амидных растворителях, что открывает возможности их использования для получения различных композитов.

Изображения СЭМ, представленные на рис. 3а, наглядно демонстрируют, что конъюгат 2-фенилбензимидазола с малослойным фторидом графена имеет рыхлую пористую морфологию, а листы функционализированного графена расположены хаотично, что хорошо согласуется с данными РФА. Из ПЭМ-изображения (рис. 3б) видно, что структура конъюгата 2-фенилбензимидазола с малослойным фторидом графена представлена беспорядочно агрегированными, тонкими, смятыми листами с дефектной структурой, тогда как для малослойного фторида графена (рис. 3в, г) характерно присутствие слоистых структур [22, 23]. Изменение морфологии графенового материала, вероятно, связано с высоким содержанием привитых бензимидазольных фрагментов, что также наблюдалось в случае описанных ранее трехмерных сеток с бисбензимидазольными циклами [24].

Таким образом, в результате взаимодействия 2-фенилбензимидазола с фторидом графена состава C_2F впервые получен бензимидазол-функционализированный графен. Показано, что проведение реакции в среде сульфолана позволяет увеличить степень функционализации по сравнению с использованием толуола.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2-Фенилбензимидазол (Sigma-Aldrich), ацетон (ЗАО «Экос-1») использовали без дополнительной очистки. Сульфолан перегоняли в инертной атмосфере при пониженном давлении. Толуол, пиридин кипятили с обратным холодильником в присутствии твердого КОН с последующей перегонкой.

Элементный анализ проводили на автоматическом элементном CHN-анализаторе Carlo Erba, модель 1106. Определение фтора выполнено спектрофотометрическим методом в виде комплекса с лантан-ализаринкомплексом после сжигания образца в колбе, наполненной кислородом (по Шенигеру). ИК спектры зарегистрированы на спектрометре ALPHA (Bruker) в диапазоне волновых

чисел 4000–400 cm^{-1} . Образцы готовили в виде таблеток с KBr. Спектры КР зарегистрированы на спектрометре Nicolet Almega XR Dispersive Raman (Thermo Scientific). Образцы получали в виде тонких пленок фильтрованием графеновых дисперсий в толуоле на мембранном фильтре (размер пор 0.2 мкм, Владисарт). РФА выполнен на дифрактометре D8 Advance Bruker AXS (CuK_{α} -излучение).

Малослойный графен был получен в режиме термоудара интеркалированных соединений фторированного графита [16]. Оксид графена получали окислением природного графита по методу Хаммерса [15]. Восстановленный оксид графена получали термическим восстановлением оксида графена [16]. Малослойный фторид графена получали фторированием малослойного графена с использованием ClF_3 [16].

Функционализация малослойного графена/восстановленного оксида графена 2-фенилбензимидазолом. 30 мг малослойного графена или восстановленного оксида графена помещали в стеклянный реактор, после чего добавляли 60 мл N-метилпирролидона. Смесь диспергировали в течение 30 мин в ультразвуковой ванне Сапфир УЗВ-2.8 (мощность – 100 Вт, частота – 35 кГц). Параллельно готовили раствор 485 мг (2.5 ммоль) 2-фенилбензимидазол в 10 мл N-метилпирролидона и при постоянном перемешивании добавляли в него 180 мг (7.5 ммоль) NaN до образования интенсивного красного окрашивания и прекращения выделения водорода. Полученный раствор смешивали с дисперсией малослойного фторида графена и нагревали при 60°C 72 ч в инертной атмосфере. Далее реакционную массу выливали в ацетон и перемешивали в течение 20 мин. Осадок отфильтровывали и тщательно промывали на фильтре ацетоном. Сушили до постоянной массы в вакуумном шкафу при 60°C.

Функционализация малослойного фторида графена 2-фенилбензимидазолом. На первой стадии 50 мг малослойного фторида графена диспергировали в 50 мл соответствующего растворителя (сульфолан или толуол) с использованием ультразвуковой ванны Сапфир УЗВ-2.8 (мощность – 100 Вт, частота – 35 кГц) в течение 60–90 мин. К полученной дисперсии прибавляли при перемешивании 388 мг (2 ммоль) 2-фенилбензимидазола, затем раствор нагревали до 40°C и добавляли

0.5 мл (6 ммоль) пиридина. Реакционную смесь нагревали до 80°C и перемешивали в течение 5–7 ч в атмосфере аргона. По окончании синтеза реакционную массу выливали в избыток ацетона и перемешивали в течение 20 мин. Осадок отфильтровывали и многократно промывали на фильтре ацетоном. Продукт сушили в вакууме при 40°C до постоянной массы.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Матвеев Захар Андреевич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0561-0580>

Холхоев Бато Чингисович, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5963-1099>

Макотченко Виктор Герасимович, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7176-2745>

Федоров Владимир Ефимович, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1057-3342>

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность С.А. Минаевой (Институт фотонных технологий Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» РАН) за изучение образцов методом спектроскопии КР.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках государственного задания Байкальского института природопользования СО РАН с использованием приборной базы Центра коллективного пользования Байкальского института природопользования СО РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V., Firsov A.A. // *Science* 2004. Vol. 306. N 5696. P. 666. doi 10.1126/science.1102896
2. Geim A.K., Novoselov K.S. // *Nature Mater.* 2007. Vol. 6. N 3. P. 183. doi 10.1038/nmat1849
3. Castro Neto A.H., Guinea F., Peres N.M.R., Novoselov K.S., Geim A.K. // *Rev. Mod. Phys.* 2009. Vol. 81. N 1. P. 109. doi 10.1103/RevModPhys.81.109

4. Лисичкин Г.В., Фадеев А.Ю., Сердан А.А., Нестеренко П.Н., Фурман Д.Б. *Химия привитых поверхностных соединений*. М.: Физматлит, 2003. 592 с.
5. Buinov A.S., Gafarova E.R., Grebenik E.A., Bardakova K.N., Kholkhoev B.Ch., Veryasova N.N., Nikitin P.V., Kosheleva N.V., Shavkuta B.S., Kuryanova A.S., Burdukovskii V.F., Timashev P.S. // *Polymers*. 2022. Vol. 14. N 18. P. 3792. doi 10.3390/polym14183792
6. Chen D., Feng H., Li J. // *Chem. Rev.* 2012. Vol. 112. N 11 P. 6027. doi 10.1021/cr300115g
7. Gorenskaia E.N., Kholkhoev B.Ch., Ochirov B.D., Makotchenko V.G., Yusin S.I., Fedorov V.E., Burdukovskii V.F. // *Mendelev Commun.* 2018. Vol. 28. P. 184. doi 10.1016/j.mencom.2018.03.025
8. Choi J., Kim K.-J., Kim B., Lee H., Kim S. // *J. Phys. Chem. (C)*. 2009. Vol. 113. P. 9433. doi 10.1021/jp9010444
9. Liu L.-H., Zorn G., Castner D.G., Solanki R., Lerner M.M., Yan M. // *J. Mater. Chem.* 2010. N 20. P. 5041. doi 10.1039/c0jm00509f
10. Strom T.A., Dillon E.P., Hamilton C.E., Barron A.R. // *Chem. Commun.* 2010. Vol. 46. P. 4097. doi 10.1039/c001488e
11. Whitener K., Stine R., Robinson J., Sheehan P. // *J. Phys. Chem. (C)*. 2015. Vol. 119. P. 10507. doi 10.1021/acs.jpcc.5b02730
12. Stine R., Ciszek J.W., Barlow D.E., Lee W.-K., Robinson J., Sheehan P. // *Langmuir*. 2012. N 28. P. 7957. doi 10.1021/la301091f
13. Matochova D., Medved M., Bakandritsos A., Stekly T., Zboril R., Otyepka M. // *J. Phys. Chem. Lett.* 2018. N 9. P. 3580. doi 10.1021/acs.jpclett.8b01596
14. Georgakilas V., Otyepka M., Bourlino A.B., Chandra V., Kim N., Kemp K.C., Hobza P., Zboril R., Kim K.S. // *Chem. Rev.* 2012. Vol. 112. N 11. P. 6156. doi 10.1021/cr3000412
15. Кулакова И.И., Лисичкина Г.В. // *ЖОХ*. 2020. Т. 90. № 10. С. 1921; Kulakova I.I., Lisichkin G.V. // *Russ. J. Gen. Chem.* 2020. Vol. 90. P. 1921. doi 10.1134/S1070363220100151
16. Makotchenko V.G., Grayfer E.D., Nazarov A.S., Kim S.-J., Fedorov V.E. // *Carbon*. 2011. Vol. 49. N 10. P. 3233. doi 10.1016/j.carbon.2011.03.049
17. Maity S., Sannigrahi A., Ghosh S., Jana T. // *Eur. Polymer J.* 2013. Vol. 49. P. 2280. doi 10.1016/j.eurpolymj.2013.05.011
18. Sukumar P.R., Wu W., Markova D., Unsal O., Klapper M., Klaus Mullen K. // *Macromol. Chem. Phys.* 2007. Vol. 208. P. 2258. doi 10.1002/macp.200700390
19. Холхоев Б.Ч., Буинов А.С., Козлова М.Н., Макотченко В.Г., Федоров В.Е., Бурдуковский В.Ф. // *ЖПХ*. 2018. Т. 91. № 3. С. 352; Kholkhoev B.Ch.,

- Buinov A.S., Kozlova M.N., Makotchenko V.G., Fedorov V.E., Burdukovskii V.F.* // Russ. J. Appl. Chem. 2018. Vol. 91. N 3. P. 392. doi 10.1134/S1070427218030084
20. *Dubecky M., Otyepkova E., Lazar P., Karlicky F., Petr M., Cepe K., Banas P., Zboril R., Otyepka M.* Reactivity of fluorographene: a facile way toward graphene derivatives // J. Phys. Chem. Lett. 2015. V. 6. N 8. P. 1430-1434. doi 10.1021/acs.jpcllett.5b00565
21. *Fedorov V.E., Grayfer E.D., Makotchenko V.G., Nazarov A.S., Shin H.-J., Choi J.-Y.* // Croat. Chem. Acta. 2012. Vol. 85. N 1. P. 107. doi 10.5562/cca1972
22. *Назаров А.С., Макотченко В.Г., Федоров В.Е.* // Неорг. матер. 2006. Т. 42. № 11. С. 1379; *Nazarov A.S., Makotchenko V.G., Fedorov V.E.* // Inorg. Mater. 2006. Vol. 42. N 11. P. 1260. doi 10.1134/S002016850611015X
23. *Zboril R., Karlicky F., Bourlinos A.B., Steriotis T.A., Stubos A.K., Georgakilas V., Safarova K., Jancik D., Trapalis C., Otyepka M.* // Small. 2010. Vol. 6. N 24. P. 2885. doi 10.1002/sml.201001401
24. *Gorenskaia E.N., Kholkhoev B.Ch., Makotchenko V.G., Ivanova M.N., Fedorov V.E., Burdukovskii V.F.* // J. Nanosci. Nanotechnol. 2020. Vol. 20. N 5. P. 3258. doi 10.1166/jnn.2020.17388

Functionalization of Graphene Fluoride with 2-Phenylbenzimidazole

**Z. A. Matveev^a, B. Ch. Kholkhoev^a, V. G. Makotchenko^b, M. N. Ivanova^b,
V. E. Fedorov^b, and V. F. Burdukovskii^{a,*}**

^a Baikal Institute of Nature Management, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, 670047 Russia

^b A.V. Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia

*e-mail: burdvit@mail.ru

Received March 24, 2023; revised June 27, 2023; accepted June 28, 2023

The interaction of graphene fluoride with 2-phenylbenzimidazole afforded a new benzimidazole-functionalized graphene material. It was shown that carrying out the reaction in sulfolane in the presence of pyridine provides a higher degree of functionalization. The formation of the target product was confirmed by elemental analysis, IR and Raman spectroscopy.

Keywords: graphene, graphene fluoride, 2-phenylbenzimidazole