

# Экологический Наука Nano



Принятая рукопись

Эту статью можно процитировать до того, как будут опубликованы номера страниц, для этого, пожалуйста, используйте: M. Shams, L. Гвини, Л. Хуанг, М. Рамеш, Х. Янг, М. К. Херсам и И. Чоудхури, Экологические науки: Нано, 2019, DOI: 10.1039/C9EN00355J.



Это принятая рукопись, которая прошла Процесс рецензирования Королевским химическим обществом и была принята к публикации.

Принятые рукописи вскоре после этого публикуются в Интернете, принятие перед техническим редактированием, форматированием и корректурой. Используя этот бесплатный сервис, авторы могут публиковать свои результаты сообществу в форме, доступной для цитирования, прежде чем мы опубликуем отредактированный Статья. Мы заменим эту Принятую рукопись отредактированной и отформатированной предварительной статьей, как только она будет доступна.

Вы можете найти дополнительную информацию о принятых рукописях в [руководстве для авторов](#).

Пожалуйста, обратите внимание, что техническое редактирование может внести незначительные изменения в текст и / или графику, которые могут изменить содержание. Стандартные условия журнала и этические рекомендации, изложенные [в нашем информационном центре для авторов и рецензентов, остаются в силе. Ни в коем случае](#) в любом случае Королевское химическое общество несет ответственность за любые ошибки или упущения в этой Принятой рукописи или любые последствия, вытекающие из использования любой содержащейся в ней информации.

## ЗАЯВЛЕНИЕ ОБ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЗНАЧИМОСТИ

Наноматериал графен является одним из наиболее часто используемых наноматериалов на основе углерода в ОТРАСЛИ. Однако разложение графеновых наноматериалов стало экологической проблемой.

Хотя было показано, что оксид графена подвержен разложению под воздействием солнечного света, он все еще является неизвестно, как различные функциональные группы в наноматериалах оксида графена могут играть роль в деградации. В этом исследовании изучалось влияние функциональных групп на деградацию графена были исследованы наноматериалы под воздействием прямых солнечных лучей. Деградация наноматериалов была установлено, что она напрямую связана с функциональными группами, присутствующими на базовой плоскости графена наноматериалы. В частности, гидроксильные и эпоксидные функциональные группы наиболее восприимчивы к фотодеградации. Под воздействием солнечного света количество кислородсодержащих функциональных групп на всех графеновых наноматериалах со временем уменьшается, при этом полностью восстановленный оксид графена демонстрирует самая низкая скорость разложения благодаря наличию меньшего количества активных функциональных групп на поверхности. В целом, эти результаты позволяют предположить, что кислородсодержащие функциональные группы на базальной плоскости являются основными инициаторами фотодеградации графеновых наноматериалов. Эта работа предоставляет важное понимание роли функциональных групп в стабильности и деградации графена наноматериалы и, таким образом, способствует разработке устойчивых применений этих материалов наноматериалы.

**Влияние функциональных групп на деградацию графена****Оксидные наноматериалы**

Мехназ Шамса, Линда М. Гвинейб, Лицзюань Хуанч, Мани Рамешб, Сяонин Янч, Марк К. Херсамб и Индранил Чоудхурья\*

Факультет гражданского строительства и охраны окружающей среды, Университет штата Вашингтон, Пуллман, WA 99164, США

б Факультеты материаловедения и инженерии, химии и медицины, Северо-Западный Университет, Эванстон, Иллинойс 60208, США

с Колледж химического машиностроения, Нанкинский технический университет, Нанкин, 21108, Китай

\* Автор-корреспондент: [indranil.chowdhury@wsu.edu](mailto:indranil.chowdhury@wsu.edu) ; 509-335-3721

## АБСТРАКТНЫЙ

Влияние функциональных групп на деградацию наноматериалов оксида графена под действием прямых солнечных лучей исследовали путем систематического изменения химического состава поверхности. Используя в процессе сольвотермического восстановления были получены графеновые наноматериалы с различной степенью окисления, включая оксид графена, частично восстановленный оксид графена и полностью восстановленный оксид графена. Были тщательно изучены физические и химические свойства наноматериалов охарактеризованы до и после воздействия искусственного солнечного света. Было определено, что деградация наноматериалов напрямую связана с функциональными группами, присутствующими в базальной плоскости графеновых наноматериалов. В частности, функциональные группы гидроксила и эпоксидной смолы наиболее подвержены фоторазложению. При воздействии солнечного света количество кислорода- содержание функциональных групп во всех графеновых наноматериалах уменьшается со временем, при этом полностью восстановленный оксид графена демонстрирует наименьшую скорость разложения из-за присутствия меньшего количества активные функциональные группы на поверхности. В целом, эти результаты свидетельствуют о том, что кислородсодержащие функциональные группы на базальной плоскости являются основными инициаторами фотодеградации из графеновых наноматериалов.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Двумерные (2D) наноматериалы исследуются для множества применений в электронной, биомедицинской, фармацевтической, косметической, энергетической и лакокрасочной промышленности.<sup>1-5</sup> В частности, графен и другие наноматериалы на основе углерода используются во многих областях применения в окружающей среде включая покрытия, катализ и в качестве сорбентов для очистки воды и сточных вод.<sup>2, 6</sup> 2D Лист графена, ячеистая решетка которого состоит из sp<sup>2</sup>-гибридизированных атомов углерода, демонстрирует уникальные физические и химические характеристики.<sup>7</sup> Гексагональная кольцевая структура графен напоминает полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и может рассматриваться как большой лист из множества сплавленных ПАУ.<sup>8</sup> Традиционные формы графена, используемые в настоящее время в различных области применения включают первичный графен, оксид графена (GO) и восстановленный оксид графена (rGO). В то время как чистый графен часто является наиболее желательным для применения, GO и rGO чаще используются из-за их масштабируемых и экономически эффективных методов производства. GO - это окисленная форма графена с дополнительными функциональными группами, такими как эпоксидная, гидроксильная, карбонильная, и карбоксильные группы, ковалентно связанные на базисных плоскостях (для эпоксидных и гидроксильных групп) или по краям (для карбонильных и карбоксильных групп).<sup>9</sup> Эти функциональные группы делают GO гидрофильным и, следовательно, легко диспергируемым в воде.<sup>10</sup>

Разложение и трансформация графеновых наноматериалов должны быть хорошо изучены в чтобы установить их потенциальные риски для окружающей среды. Например, графен может трансформироваться и разлагаться на многочисленные комбинации ПАУ,<sup>11,12</sup> которые потенциально канцерогенны и представляют собой ряд рисков для окружающей среды и здоровья.<sup>8, 13</sup> Реакции Фентона могут вызывать окисление графена материалы,<sup>14</sup> в то время как микробиологические взаимодействия могут вызывать восстановление.<sup>15</sup> Следовательно, несколько типов взаимодействия могут происходить с взвешенными графеновыми материалами в окружающей среде.<sup>16</sup> Фотодеградация является одним из нескольких путей, которые могут вызывать трансформацию графена

1...  
2...  
3...  
4... наноматериалы в окружающей среде. Таким образом, для понимания  
5... долгосрочных экологических влияние графеновых наноматериалов, важно  
6...  
7... изучать фотолиз и деградацию, опосредуемые солнечным светом .

9...  
10...  
2 1 Недавние исследования показали, что GO может быть очень устойчив к агрегации в естественной водной среде

A 3 34 4 § 5 916 37...  
17, 18 указывают на то, что GO будет сохраняться в воде, где foto-  
может произойти трансформация. 17, 18 Кроме того, эта трансформация может повлиять на судьбу

19. и транспортировку этих материалов. Трансформация под действием солнечного света, фотолиз является одним

20. из основных путей, с помощью которых углеродсодержащие материалы, такие как фуллерены, превращаются

21...  
@2...  
-23 в CO<sub>2</sub> и другие кислородсодержащие функциональные вещества. 19-27 Некоторые недавние

24 24 725 26 26 исследований показали, что графен фотопротивоактивен. 12, 28-30 Например, одно исследование показало, что GO

27 28 28 легко реагирует при моделируемом воздействии солнечного света, образуя фрагментированные фотопродукты, похожие

29... на восстановленный GO (rGO), а также с низким молекуллярной массой (LMW). 31 Кроме того, фотопротивоактивность

31 31 32... GO включает в себя одновременное образование окислительных и восстановительных переходных частиц.

33 33 34 | 35 35 36 36 °37 На сегодняшний день в исследованиях изучалась только фотодеградация GO. Влияние функциональных

38 38 39... групп на процесс деградации графеновых наноматериалов до сих пор неизвестно. Эти знания

40... 41... пробелы побудили данное исследование определить влияние функциональных групп на прямой

42... 43... 44... фотолиз графеновых наноматериалов. Мы предполагаем, что разложение графена

45... 46... 47... чешуйки начинаются в базальных плоскостях, что вызвано присутствием эпоксидного и гидроксильного

48 48 49... 50... функционалов Группы. Таким образом, мы предполагаем, что присутствие, идентичность и количество этих

51... 52... 53... 54... функциональных групп будут влиять на процесс разложения материалов. 32, 33 Более того, мы

55... 56... 57... предполагаем, что rGO будет более устойчив к разложению из-за присутствия меньшего количества функциональных

58... 59... 60... групп и повышенной гидрофобности. 16 Судьба и трансформация наноматериалов являются ключевыми факторами

55... 56... 57... для учитывайте при определении их экологического риска. 34 Эта работа дает важное представление о

роль функциональных групп в стабильности и деградации графеновых наноматериалов, и, таким образом, способствует разработке устойчивых применений этих материалов.

## **2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

## 2.1 Материалы

Материалы на основе оксида графена были синтезированы с использованием модифицированного метода

Хаммерса.35 Для изменения функциональные группы на поверхности, два образца восстановленного

GO—частично восстановленного оксида графена (rGO-2h) и полностью восстановленный оксид

графена (rGO-5h) — были получены сольвотермическим процессом восстановления. В частности, GO

сuspended in N-methyl-2-pyrrolidone (NMP) and heated to 150°C under constant stirring on a hot plate.

силиконовым маслом. Нагрев с обратным холодильником прекращали через 2 часа и 5 часов для достижения

различных уровней восстановления. После сольватермического восстановления rGO отделяли от NMP с помощью

вакуумной фильтрации с использованием фильтров из оксида алюминия толщиной 0.1 мкм (Миллипора), тщательно

промывают водой DI и повторно диспергируют в воде DI с приблизительной концентрацией 1 мг/мл 36 Все водные

растворы для облучения готовили с использованием Milli-Q (Деионизированная вода,  $\geq 18 \text{ M}\Omega$ ) воды. Каждый исходный

последний набор имеет значение  $50 \text{ cm}^{-2}$  и соответствует  $(\text{CO}_1 + \text{CO}_2 + \text{CO}_5)$  в таблице 10.1.

## 2.2 Исследования Фоторазложения

Все эксперименты с имитацией солнечного света проводились в солнечном симуляторе Atlas SunTest CPS +,

оснащенным ксеноновой дуговой лампой мощностью 1 кВт. Эксперименты с солнечным светом проводились в

боросиликате стеклянные пробирки (наружный диаметр = 1,3 см; объем = 24 мл; соответствует стандарту ASTM Тип

1, класс А и USP стекло типа 1), которые были заполнены рабочими растворами на 10 мл. Пробирки для образцов

1...  
2...  
3...  
4...  
5...  
6...  
7...  
8...  
9...  
10...  
21...  
42...  
A3...  
344...  
§5...  
916...  
37...  
19...  
20...  
21...  
@2...  
-23...  
2424...  
2525...  
2626...  
27...  
2828...  
29...  
были запечатаны колпачками с открытым верхом, покрытыми газонепроницаемым политетрафторэтиленом (PTFE), и оставались включенными сверху накройте сеткой, чтобы держать их погруженными в терmostатическую водяную баню ( $25^{\circ}\text{C}$ ) во время облучения. Интенсивность падающего света на поверхность трубы (от 300 до 800 нм) составляла 0,065 Вт/см<sup>2</sup>. Для кинетических исследований была подготовлена серия пробирок для облучения. Тесты на фоторазрушение продолжались в течение 168 ч. В определенные моменты времени во время облучения отдельные пробирки извлекались из реактора для химического анализа. После извлечения пробирки оборачивали алюминиевой фольгой и хранили в холодильнике. Темные контрольные пробирки оборачивали алюминиевой фольгой и хранили при тех же условиях эксперимента. Детали контрольного исследования описаны во вспомогательной информации.

### 2.3 Характеристика материала.

Атомно-силовая микроскопия (ACM) использовалась для контроля размера и морфологии графена хлопья оксида. Физические размеры ГО, включая толщину чешуек и поперечный размер, были определены количественно на основе анализа изображений ACM, как описано ранее.<sup>36,31</sup> Для получения изображений ACM кремний пластины очищали и сушили, а затем функционализировали монослоем (3-аминопропила) триэтоксисилан (APTES) путем замачивания пластин в 2,5 мм растворе APTES в изопропиловом спирте (IPA) в течение 30 минут. После обработки APTES пластины промывали IPA и высушивали с помощью азотного пистолета. Растворы GO обрабатывали ультразвуком в ванне в течение 5 минут, прежде чем использовать наносили каплями на функциональные пластины APTES. ГО оставляли на 10 минут на пластину промывали водой и высушивали с помощью азотного пистолета. Затем образцы отжигали при  $250^{\circ}\text{C}$  в течение 30 минут на горячей плите перед визуализацией с помощью Cypher Asylum ES

ACM.

1...  
2...  
3...  
4... Спектры ультрафиолетовой (UV)-видимой спектроскопии собирали с помощью прибора Perkin  
5...  
6... Elmer Lambda 365 Спектрофотометр УФ-видимого поглощения, оснащенный кварцевой кюветой с  
7...  
8... длиной светового потока 1 см. Изменения в УФ-видимом спектре использовались для контроля  
9...  
10... концентрации оксида графена и изменения в свойствах поглощения света.

21  
42...  
A 3  
34 4  
§ 5  
916  
37... Были измерены дзета-потенциал, гидродинамический диаметр и показатель полидисперсности частиц  
с использованием Zetasizer Nano ZS (Malvern Instruments, Inc.). Кварцевую кювету длиной светового пути 1 см

19.  
20.  
21...  
@2...  
-23  
24 24  
725  
26 26  
27  
28 28  
29... использовали для измерения размера, а для дзета-потенциала использовалась свернутая капиллярная  
ячейка DTS1070 измерения. Размер частиц определяется с помощью коэффициента диффузии, который затем  
используется для рассчитайте размер частиц, обычно в сферическом эквиваленте.<sup>37</sup> Кроме того, при расчете  
значений дзета-потенциала на основе измерений ЕРМ используется уравнение Смолуховского, которое предполагает  
наличие сферических частиц. Следовательно, рекомендуется использовать этот подход для сферических частиц.<sup>38</sup>  
растворов были промыты в ванне обрабатывались ультразвуком в течение 5 минут перед измерением.

31 31  
32...  
33 33  
34 | XPS был использован для определения химического состава графеновых  
35 35  
36 36 наноматериалов. Для XPS, приблизительно 5 мг GO или rGO в воде DI были нанесены на  
°37  
38 38 мембранны из ПТФЭ толщиной 1 мкм (Millipore) с использованием вакуумной  
39...  
40... фильтрации. Пленке давали отстояться в течение 15 минут, промывали 30 мл воды, а затем высушивали  
41...  
42... на воздухе. Измерения XPS проводили быстро с помощью Thermo Scientific ESCALAB 250Xi. Спектры  
43...  
44... XPS были скорректированы с учетом фона и подогнаны под максимумы вручную.<sup>36</sup>  
45...  
46...  
47...  
48 48

49... Общий органический углерод (ТОС) измеряли с использованием общего органического углерода Shimadzu  
50...  
51... TOC-Vcsh анализатор по методу NDIR (горение при температуре 720 ° С благодаря прилагаемому устройству для  
52...  
53... измерения общего азота ). Анализатор ТОС способен определять общее содержание органического углерода  
54...  
55...  
56...  
57...  
58  
59...  
60... концентрации в образце. Образец решения были разбавлены и перенесены в 40 мл флаконах. В

1...  
2...  
3...  
4...  
5...  
6...  
7...  
  
объем введенного раствора составлял 80 мкл, по три инъекции для каждого образца. После анализа 10 образцов была проведена промывка.

#### 2.4 Статистический анализ

9...  
10...  
2 1  
42...  
A 3  
34 4  
§ 5  
916  
37...  
  
Для анализа данных использовалось статистическое тестирование. Для проверки гипотез использовались t-тесты с двумя выборками проведено с использованием программного обеспечения OriginPro 2016 (OriginLab Corporation, Массачусетс) для гарантии статистической значимости выводов. Значения вероятности (Р) менее 0,05 были считается статистически значимым.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### 3.1 Физико-химические свойства GO и rGO

31 |  
32...  
33 33  
34 | В таблице 1 показаны распределения поперечных размеров на основе АСМ-изображений GO и  
35 35  
36 36  
°37 rGO образцы до и после облучения. До облучения боковые размеры всех GO и rGO  
38 38  
39... наноматериалы одинаковы, что указывает на то, что процесс восстановления не изменяет  
40...  
41... физические размеры хлопьев GO или rGO ( $P > 0,05$ ). Измерения гидродинамического диаметра  
42...  
43... подтвердили, что не было существенной разницы ( $P > 0,05$ ) в размере частиц между исходными  
44...  
45... Дисперсии GO, rGO-2h и rGO-5h (таблица S1). Однако размеры rGO-2h и rGO-5h являются  
46...  
47... статистически отличается ( $P < 0,05$ ), при этом rGO-5h имеет больший размер. Измерения  
48 48  
49... дзета-потенциала, во всех исходных дисперсиях указаны стабильные  
50...  
51...  
52... дисперсии, обусловленные электростатическим отталкиванием между частицами (таблица S2).

Исходные рентгеновские спектры GO, rGO-2h и rGO-5h показаны на рисунке 3. Спектры демонстрируют три основные пики, соответствующие C-C при 284,8 эВ, эпоксидным и гидроксильным функциональным группам (C-O) при 286,9 эВ и карбонильные группы (C=O) при 289 эВ.<sup>39,41</sup> Эти пики были определены количественно и перечислены в таблице 2. Во время сольватермического процесса эпоксидные и гидроксильные группы на базальной плоскости снижаются уровни GO, о чем свидетельствует уменьшение пика C-O и общее снижение кислорода в rGO-2h и rGO-5h ( $P < 0,05$ ). Кроме того, появление пика при 292 эВ, из-за  $\pi-\pi^*$  переход, свидетельствующий о восстановлении решетки графена.

Эти данные о составе дополнительно подтверждаются спектрами оптического поглощения GO наноматериалы. Начальная дисперсия GO показывает пики поглощения при 230 нм, связанные с  $\pi-\pi^*$  переходами ароматических связей C-C и плечо при 300 нм, соответствующее  $n-\pi^*$  переходы из-за присутствия кислородсодержащих функциональных групп, таких как эпоксид (C – O - C) (рис. 4a).<sup>42-47</sup> И наоборот, исходные дисперсии rGO-2h и rGO-5h демонстрируют единую пик поглощения при 270 нм, указывающий на восстановление  $\pi$ -сопряженной сетки графена. Кроме того, исчезновение плеча при 300 нм предполагает потерю кислородсодержащего материала группы (рис. 4b, 4c).<sup>48-52</sup>

В целом, были получены три дисперсии GO, в которых систематически проводилось поверхностное окисление изменялись, в то время как другие свойства материала оставались постоянными, чтобы определить роль кислородсодержащих функциональных групп в прямом фотолизе наноматериалов семейства графеновых.

### 3.2 Фоторазрушение GO и rGO

#### 3.2.1 ACM-анализ

Три дисперсии наноматериала GO подвергали воздействию имитированного солнечного света, и размер

частиц контролировали с помощью ACM. На рисунке 1 ACM-изображения rGO-2h и rGO-5h показывают

отсутствие существенного изменения размера частиц после 24 ч облучения. Подробные количественные

результаты ACM-изображений представлены в таблице 1, не показывающие существенных

изменений  $P > 0.05$  в размер rGO-2h и rGO-5h после 24 ч облучения. С другой стороны, частицы GO

уменьшились по поперечному размеру с  $180 \pm 160 \text{ nm}$  Для  $100 \pm 50 \text{ nm}$  (уменьшение

на  $\sim 44\%$ ) в течение первых 24 часов после облучения (таблица 1). Это уменьшение размера сразу

видно на изображениях ACM (рисунок 1). Такое быстрое уменьшение поперечного размера GO указывает на

то, что материал разрушается быстро при облучении, в то время как rGO разлагается значительно медленнее.

#### 3.2.2 Анализ ТОС

Разложение частиц rGO и GO было дополнительно исследовано с помощью измерений ТОС.

Ранее было изучено восстановление органического углерода за счет окислительного фотохимического

разложения наблюдается с другими наноматериалами и загрязняющими веществами в присутствии

ультрафиолетового излучения и солнечного света.<sup>6, 53-55</sup> Образцы GO показали снижение ТОС на 32,1% после 3

дней облучения (рисунок 2). Следует отметить, что большая часть этого снижения ТОС произошла в

первые 6 часов (27,65%), но затем значительно замедлилась в течение следующих 162 часов, что указывает на

быстрое снижение GO фоторазрушение после первых 6 часов воздействия солнечного света. Снижение ТОС для

rGO-2h и rGO-5h после 3 дней облучения составил 28,8% и 14,5% соответственно, что является более медленным снижением

ТОС по сравнению с GO  $P < 0.05$  Среди образцов rGO-2h и rGO-5h самый медленный показатель

Снижение ТОС наблюдалось для rGO-5h ( $P < 0,05$ ). Эти результаты дополнительно подтверждают замедленную деградацию образцов rGO. Предыдущее исследование трансформации GO путем прямого фотолиза при моделируемом солнечном свете,<sup>31</sup> с аналогичными экспериментальными условиями, показанными масс-спектрометрией анализ показал, что прямой фотолиз быстро удаляет GO путем фотохимического преобразования его в  $\text{CO}_2$  фрагментированные фотопродукты, подобные rGO, и виды LMW (в основном гидроксилированные и / или карбоксилированные соединения ПАУ). Образование кислородсодержащих соединений ПАУ соответствовало предыдущей работе, в которой трансформация GO была вызвана реакцией Фотофентона.<sup>11, 12</sup>

### 3.2.3 Электрокинетические и гидродинамические свойства фотопреобразованных GO и rGO

Для анализа изменения размера частиц использовался Zetasizer Nano ZS. Из гидродинамического при значениях диаметра наблюдается быстрое уменьшение размера GO (~ 36%) по сравнению с rGO-2h (~ 25%) и rGO-5ч (~ 12%) через 24 ч (таблица S1;  $P < 0,05$ ). Даже через 48 ч размер GO уменьшается еще больше (~ 45%) от первоначального размера. Однако при длительной экспозиции при освещении (168 h), материал GO уменьшился по сравнению с его первоначальным размером, но это уменьшение не столь значительно аналогично уменьшению размера во время начальной экспозиции. Значительное уменьшение размера произошло во время первые часы воздействия солнечного света.<sup>31</sup> Это уменьшение размера GO было подтверждено с помощью ТОС анализ также показан на рисунке S3. С другой стороны, длительное воздействие света способствует rGO агрегация, что приводит к увеличению размеров измерений. Это уменьшение размера объясняется разрушение чешуек оксида графена при облучении, что подтверждается ACM-анализом (Рисунок 1), подразумевая, что образцы rGO разлагаются значительно медленнее.

Дзета-потенциал (ZP) является важным показателем стабильности частиц. Значения ZP обоих значений ИДУТ и образцы rGO находились в диапазоне от -30 до -50 мВ (таблица S2). Из отрицательного значения

1...  
2...  
3...  
4...  
5...  
ZP, можно сделать вывод, что частицы имеют отрицательно заряженную поверхность. Кроме того,  
6... величина ZP указывает на то, что все образцы GO стабильно распределены.<sup>56, 57</sup> Однако, несмотря  
7...  
8... на было обнаружено, что образцы rGO, имеющие отрицательный ZP большей величины, чем 30  
9... мВ, относительно нестабильный (рисунок 5b, 5c) из-за меньшего количества кислородсодержащих  
21... функциональных групп и в результате более высокой гидрофобности.<sup>16, 58, 59</sup>

### 3.2.4 Эволюция функциональных групп

19. 20. 21...  
@2...  
-23 Изменения в кислородсодержащих функциональных группах в результате фоторазложения были  
24 24 725 проверены методом XPS. На рисунке 3 и в таблице 2 представлены данные о химическом разложении GO  
26 26 27 наноматериалы. После 72 часов облучения наблюдается ~ 16%-ное восстановление гидроксильных (C-OH) и  
28 28 29... эпоксидных (C-O-C) групп в материалах rGO. GO, с другой стороны, подвергается  
31 31 32... заметному химическому восстановлению, при котором уменьшается количество гидроксильных и эпоксидных групп  
33 33 34 | 35 35 36 36 37... значительно от 39,7% до 13,9% (~ 65%) при облучении в течение 72 часов ( $P < 0.05$  и XPS  
38 38 39... спектр GO после фотодеградации напоминает спектр rGO. Эти гидроксильные и эпоксидные функциональные  
40... 41... 42... 43... 44... 45... 46... 47... 48 48 49... группы расположены в основном на базальной плоскости оксида графена, и это выдвинута гипотеза, что эти функциональные  
50... 51... 52... 53... 54... 55... 56... 57... 58... 59... 60... группы будут реагировать первыми в присутствии солнечного света, поскольку они представляют собой отдельные связанные  
группы. Функциональные группы на краях, такие как карбоновая кислота, намного более стабильны и с меньшей вероятностью  
вступят в реакцию на начальном этапе. Из спектров XPS соотношение C = O увеличивается, указывая  
на то, что Функциональные группы COOH более стабильны, и относительная доля функциональных  
групп COOH увеличивается при фоторазрушении. В результате происходят изменения в кислородсодержащих функциональных  
группах признаки фоторазложения были также подтверждены с помощью спектроскопии оптического поглощения  
UV-Vis. присутствие кислородсодержащих функциональных групп на поверхности нарушает сопряженную систему

1...  
2...  
3...  
4...  
5...  
графен, вызывающий сдвиг пиков поглощения.<sup>51, 52</sup> Образцы облучали, и  
6...  
7...  
8...  
9...  
10...  
11...  
12...  
13...  
14...  
15...  
16...  
17...  
18...  
19...  
20...  
21...  
22...  
23...  
24...  
25...  
26...  
27...  
28...  
29...  
поглощение при 400 нм контролировалось с течением времени (рисунок S4). В случае GO поглощающая  
способность увеличивалась со временем, что указывает на фотохимические изменения, вероятно, вызванные  
образованием светопоглощающих фотопродуктов.<sup>31</sup> Воздействие солнечного света  
также привело к смещению положения пика с 230 нм на 270 нм, что указывает на восстановление сети π-сопряжений  
графена (рисунок 4а). Исчезновение выступа при 300 нм предполагает удаление кислородных групп (таких  
как гидроксильные и эпоксидные группы), что согласуется с результатами XPS.<sup>48-50</sup> И наоборот, никаких  
существенных в материалах rGO наблюдаются изменения УФ-видимых спектров (рис. 4b, 4c).

24 24  
725  
26 26  
27  
28 28  
29...  
На рисунке 5а показано, что по мере прогрессирования фоторазложения цвет образцов GO темнел  
из-за воздействия солнечного света, что снова указывает на разложение GO. Ранее,<sup>60, 61</sup> этот цвет  
наблюдалось изменение, которое приписывалось частичному восстановлению сопряженного углеродного

31 31  
32...  
33 33  
34 |  
35 35  
36 36  
°37  
38 38  
39...  
40...  
41...  
42...  
43...  
44...  
45...  
46...  
47...  
48 48  
49...  
50...  
51...  
52...  
кольца сетка из-за удаления кислородсодержащих функциональных групп. Это же явление  
наблюдалось при химическом восстановлении ГО-листов, обсуждавшемся ранее.<sup>62, 63</sup> Удаление  
эти функциональные группы из-за воздействия солнечного света также могут привести к тому, что частицы  
станут более гидрофобными (рис. 5b, 5c). Эта повышенная гидрофобность может вызвать агрегацию в  
образцы rGO и задерживают разложение rGO-2h и rGO-5h. Более того, сверх определенного  
во время облучения частицы rGO начинают образовывать более крупные агрегаты, которые могут  
оседать, уменьшая возможность фоторазложения материала. Характеристики агрегации и осаждения  
графеновые наноматериалы, наблюдаемые в этом исследовании, согласуются с предыдущими  
исследованиями с углеродом нанотрубки (УНТ), где наблюдалось, что ультрафиолетовое облучение  
дестабилизировало коллоидную суспензию УНТ. В этих исследованиях<sup>24, 25</sup> было замечено, что удаление кислородсодержащих  
функциональных групп уменьшало электростатическое отталкивание между частицами и  
вызывало агрегацию. Однако, в образцах не наблюдалось значительных структурных преобразований.<sup>24, 25</sup>

1...  
 2...  
 3...  
**3.3 Кинетический анализ**  
 4...  
 5...  
 6...  
 7...  
 9...  
 10...  
 2 1  
 42...  
**A 3**  
 34 4  
 § 5  
 916  
 37...  
 19.  
 20.  
 21...  
 @2...  
 -23  
 24 24  
 725  
 26 26  
 27  
 28 28  
 29...  
 31 31  
 32...  
 33 33  
 34 |  
 35 35  
 36 36  
 °37  
 38 38  
 39...  
 40...  
 41...  
 42...  
 43...  
 44...  
 45...  
 46...  
 47...  
 48  
 49...  
 50...  
 51...  
 52...  
 53...  
 54...  
 55...  
 56...  
 57...  
 58  
 59...  
 60...

Для наноматериалов GO и rGO кинетику фотолиза можно выразить следующим уравнением,

$$\frac{d[A]}{dt} = k_{obs,A} [A]$$

Где  $k_{obs,A}$  - псевдопервопорядковая константа скорости прямого фотолиза соединения A (A = GO

или rGO-2h или rGO-5h). Кинетика разложения GO протекает в две (быструю и медленную) стадии. Для GO наноматериалы, потеря

или разложение материала, которое измеряется как снижение ТОС концентрация (рисунок S5), происходит в две стадии (быструю

и медленную). Наиболее быстрое разложение происходит при первоначальном воздействии солнечного света (первые

24 часа), в течение которого  $k_{obs,GO}$  было определено, что оно составляет  $0,017 \text{ ч}^{-1} R^2 = 0.91$  После 24

ч воздействия солнечного света потеря наноматериала происходила медленнее, и  $K_{obs,GO}$  была

определенной равной  $0,007 \text{ ч}^{-1} R^2 = 0.80$  после 72 ч воздействия солнечного

света. Итак, двухступенчатая кинетика наблюдалась при фоторазрушении GO (рисунок S5). Первоначально скорость была

высокой, и псевдодеструкция наблюдалась кинетика первого порядка; затем, на второй фазе, разложение замедлилось.

Значение  $k_{obs,rGO-2h}$  незначительно уменьшилось до  $0,005 \text{ ч}^{-1} R^2 = 0.83$  по сравнению

с  $k_{obs,GO}$  в то время как  $k_{obs,rGO}$  значительно уменьшилось до 0,002

$\text{ч}^{-1} R^2 = 0.51$  по сравнению с  $k_{obs,rGO-2h}$  (Рисунок S5). Поскольку константы скорости псевдопервого

порядка для rGO-2h и rGO-5h меньше, чем у GO, это указывает на это снижение ТОС выше для материалов GO по

сравнению с материалами rGO. Следовательно, порядок скорости разложения следует за GO > rGO-2h > rGO-5h.

48  
**3.4 Предлагаемые Механизмы**  
 49...  
 50...  
 51...  
 52...  
 53...  
 54...  
 55...  
 56...  
 57...  
 58  
 59...  
 60...

На рисунке 6 показаны предлагаемые механизмы фотодеградации GO и rGO под действием прямых солнечных лучей. При прямом фотолизе, функциональные группы графеновых наноматериалов действуют как хромофоры.<sup>31, 65-67</sup>

Гидроксильные и эпоксидные функциональные группы, расположенные в основном на базальной плоскости

конечно, предполагается, что они первыми реагируют в присутствии солнечного света, поскольку они одинарно связаны  
Группы. Другие функциональные группы по краям представляют собой группы с двойным соединением, для которых требуется больше  
энергии для разрыва, чем одиночные связи, и, следовательно, с меньшей вероятностью вступают в первоначальную реакцию.<sup>68,69</sup>

Гидроксильные и эпоксидные функциональные группы (C-OH и C-O<sub>2</sub>), которые являются сильными  
электронодонорами группы поглощают光子, которые переводят электроны из основного состояния  
в возбужденное, производя много возбужденных электронов и дырок.<sup>70</sup> В конечном итоге эти  
электроны и дырки разрушают химический связи функциональных групп, инициирующие разрыв

ковалентных связей и способствующие физическому разрушению материала GO.<sup>70-74</sup>

GO, состоит из изолирующих или полупроводящих sp<sup>3</sup>-гибридизированных углеродных доменов на базальной  
плоскости и неокисленных sp<sup>2</sup>-сегментов, которые являются либо ароматическими, либо сопряженными.<sup>75</sup> Во  
время фоторедукции возбуждение запрещенной зоны полупроводниковой области отвечает за процесс  
восстановления.<sup>76</sup> А типичный полупроводник имеет энергетическую щель между валентной зоной и зоной  
проводимости. При воздействии видимого света GO поглощает光子 с энергией, равной или превышающей его  
запрещенную зону, чтобы возбудить электрон из валентной зоны в зону проводимости. Следовательно, создавая  
электрон в зоне проводимости и пустое энергетическое состояние в валентной зоне- дырку.<sup>77, 78</sup> Эти электроны и  
отверстия способствуют окислительно-восстановительным реакциям на листе GO.

Энергия связи C-O составляет 358 кДж/ моль или  $5,945 \times 10^{-19}$  Дж/фотон (Примечание: постоянная  
Авогадро, имеет значение  $6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Энергия , связанная с излучением , определяется

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

1...  
2...  
3...  
4...  
5...  
6...  
7...

Где,

E - энергия в Джоулях,

h - постоянная Планка  $h = 6.626 \times 10^{-34}$  J s),

c - скорость света, ( $c = 3.0 \times 10^8$  м с-1) и

$\lambda$  - длина волны света в единицах нм.

Чтобы разорвать кислородсодержащую связь (C-O и C-OH), требуемая длина волны рассчитывается по формуле приведенное выше уравнение равно 335 нм, что находится в пределах диапазона применяемого нами излучения (от 300 нм до 800 нм). Это количественно доказывает распад кислородсодержащих функциональных групп в базальной плоскости материала GO.

Другие функциональные группы, оставшиеся на краю, изначально не вступят в реакцию, поскольку они имеют двойную связь группы, для разрушения которых требуется больше энергии (C = O: 745 кДж / моль или  $1,237 \times 10^{-18}$  Дж / фотон, требуется длина волны 160 нм). 68, 69, 79

rGO содержит значительно меньше кислородсодержащих функциональных групп, чем GO. В частности, количество гидроксильных и эпоксидных функциональных групп значительно ниже (таблица 2). Это снижение при этом электронодонорные функциональные группы в rGO уменьшают разрыв ковалентных связей в rGO. Следовательно, rGO более устойчив к разложению, чем GO при прямом фотолизе, как мы показали в наших исследованиях фоторазложения. Кроме того, частицы rGO агрегируются из-за повышенной гидрофобности этих материалов, что может снизить вероятность фоторазложения.

Агрегация (стабильность) наноматериалов в воде существенно влияет на эффективную токсичность, перенос в окружающей среде и конечную судьбу материала. 80 Более того, агрегация может изменить

реакционная способность наночастиц и агрегатное состояние наночастиц могут быть изменены  
фотохимическими процессами окружающей среды. 81 Пониженное содержание функциональных групп  
увеличивает гидрофобность Частицы rGO. Поскольку rGO становится более гидрофобным, он становится  
более склонным к образованию агрегатов (т.е. увеличиваются в размере) и менее подвержены разложению. Таким  
образом, как реакционная способность, так и стабильность (агрегация) играют роль в разложении.

### 3.4.а. Анализ деградации с использованием теории функционала плотности (DFT)

Далее мы использовали метод DFT для характеристики термодинамического изменения энергии  
для разрушения структуры листов ГО. Мы предположили, что процесс разрушения состоит из  
двух последовательные этапы: 1) удаление функциональных групп на плоскости графена; и 2) C-C  
связь разрыв. Расчеты DFT были выполнены с использованием программного обеспечения  
ADF. 82 Рассматривались два типа GO модели: одна имеет единственную гидроксильную  
группу (обозначается как GO1, то есть rGO) и другой имеет две гидроксильные  
группы (обозначается как GO2, что означает GO). Все исходные структуры были  
оптимизированы и выполнены расчеты энергии в одной точке с помощью метода B3LYP-D3/TZP .

Из наших расчетов (рисунок 7а) следует, что на первом этапе происходит удаление одной  
гидроксильной функциональной группы кинетический процесс с существованием переходного  
состояния (TS). Однако на втором этапе разрыв связи C-C является термодинамически неблагоприятным  
процессом с потерями энергии. Для GO2, соответствующего более высокой степени окисления, барьер  
переходного состояния очень мал ( $\sim 0,6$  ккал / моль), однако энергетический барьер для удаления  
гидроксильной группы для GO1 составляет  $\sim 6,0$  ккал / моль, что, очевидно, больше, чем у GO2. Далее  
мы рассчитали энергию профили для предполагаемого процесса разложения GO с разрывом Cc, при  
котором происходит разрыв трех связей Cc. Как показано на рис. 7Б, необходимая энергия разрыва c-c

облигаций в структуре GO1 является в некоторой степени выше, чем в GO2, показывая, что

разложение GO с более низкой степенью окисления, которым является GO1 (rGO), протекает сложнее. ИТ следует отметить, что разница в энергии относительно незначительна, возможно, из-за небольшого размера графеновая модель содержит всего 1-2 гидроксильные группы. Однако это разные энергетические профили действительно, это подтверждает экспериментальный вывод о том, что при более высокой степени окисления может быть достигнуто большее разрушение листов ГО.

В целом, эти результаты свидетельствуют о том, что воздействие солнечного света вызывает значительную деградацию графена

оксид, но никаких существенных изменений в восстановленных наноматериалах оксида графена не наблюдается. Кислород- содержащие функциональные группы на базальной плоскости являются наиболее вероятными фотоприводимыми участками, которые способствуют разрушению наноматериалов GO.83-85 Присутствие меньшего количества кислородсодержащих функциональные группы на поверхности материалов rGO приводят к замедленному разрушению материала.

#### 4. ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.

Совокупные результаты этого исследования показывают, что поверхностное окисление графеновых наноматериалов сильно влияет на фотолиз, вызванный солнечным светом. Кислородсодержащие функциональные группы, в первую очередь те, которые присутствуют на базальной плоскости, играют важную роль в фоторазложении ГО. Это разложение окажет очевидное влияние на судьбу этих появляющихся материалов в окружающей среде. Основываясь на результатах этого исследования, можно предположить, что оксид графена наноматериалы будут подвергаться разложению в естественных поверхностных водах из-за воздействия солнечного света, которое потенциально приводит к выбросу наночастиц в окружающую среду. Поскольку наночастицы продемонстрировали потенциальную опасность для здоровья человека и окружающей среды, их выброс в течение жизненного цикла можно ограничить коммерциализация этих наноматериалов. В частности, наноматериалы из оксида графена с более высокими уровнями окисления будут подвергаться более высокой скорости фотодеградации, в то время как восстановленные формы

оксид графена будет демонстрировать более высокую устойчивость к такому разложению из-за меньшего количества функциональных групп на поверхности. Эти результаты также будут полезны для разработки экологически чистого графена наноматериалы для различных применений. Для нанесения покрытий и фотокаталитических применений графен желательно, чтобы наноматериалы были устойчивы к фоторазложению. Следовательно, графен с меньшим количеством кислородсодержащих функциональных групп будет полезен для покрытий и фотокаталитических приложения.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Эта работа была поддержана грантом Геологической службы США (2016WA411B) через штат Вашингтонский центр водных исследований. Подготовка образцов и их характеристика в Северо-Западный университет получил поддержку Национального научного фонда и Агентство по охране окружающей среды в соответствии с Соглашением о сотрудничестве под номером DBI-1266377.

## Вспомогательная информация.

Дополнительная информация о материалах, методах и результатах доступна во Вспомогательной информации.

## ССЫЛКИ

1. \_ К. С. Новоселов, В. И. Фалько, Л. Коломбо, П. Р. Геллерт, М. Г. Шваб и К. Ким, Дорожная карта для графена, *Nature*, 2012, 490, 192.
2. \_ К. К. Кемп, Х. Сима, М. Салех, Н. Х. Ле, К. Махеш, В. Чандра и К. С. Ким, Экологические применения с использованием графеновых композитов: восстановление воды и адсорбция газов, *Наноразмерные*, 2013, 5, 3149-3171.
3. \_ К. Чанг, Ю.-К. Ким, Д. Шин, С.-Р. Рю, Б. Х. Хонг и Д.-Х. Мин, Биомедицинские приложения о графене и оксиде графена, *Отчеты о химических исследованиях*, 2013, 46, 2211-2224.
4. \_ К. Ченг, Дж. Чжан, С. Ли, Ю. Ся, К. Не, З. Ши, Дж. Л. Куэльяр-Камачо, Н. Ма и Р. Хааг, А Обрабатываемый водой и биоактивный многовалентный графеновый нанопленка для получения высокой гибкости *Биоэлектронные пленки и нановолокна, передовые материалы*, 2018, 30, 1705452.
5. \_ К. Хэ, З.-К. Ши, К. Чэн, Х.-К. Лу, М. Чжоу, С.-Д. Сунь и К.-С. Чжао, оксид графена и совместно легированные сульфированным полианионом гидрогелевые пленки для двухслойных мембранных превосходной гемосовместимость и антибактериальная активность, *Наука о биоматериалах*, 2016, 4, 1431-1440.
6. \_ Н. Сэвидж и М. С. Диалло, Наноматериалы и очистка воды: возможности и вызовы, *Журнал исследований наночастиц*, 2005, 7, 331-342.
7. \_ М. Алиофхазраи, Н. Али, В. И. Милн, К. С. Озкан, С. Митура и Дж. Л. Джервазони, Графен *Научный справочник: Электрические и оптические свойства, CRC Press*, 2016.
8. \_ А. К. Гейм, Графен: состояние и перспективы, *Наука*, 2009, 324, 1530.
9. \_ Д. Р. Дрейер, С. Парк, К. В. Белавски и Р. С. Руоф, Химия оксида графена, *Chem. Сокр. изд.*, 2010, 39, 228.
10. *T. Накато, Дж. Кавамата и С. Такаги, Неорганические нанолистовые материалы и материалы на их основе: Основы и приложения двумерных систем, Springer, Япония, 2017.*

- 1...  
2...  
3...  
4...  
5...  
6...  
7...  
  
9...  
10...  
21  
42...  
A3  
34 4  
§ 5  
916  
37...  
  
19.  
20.  
21...  
22 22  
-23  
24 24  
25 25  
26 26  
27  
28 28  
29  
  
31 |  
33 33  
34 |  
35 35  
36 36  
°37  
38 38  
  
44...  
45...  
46...  
47...  
48  
49...  
50...  
51...  
52...  
53...  
54...  
55...  
56...  
57...  
58  
59...  
60...  
  
11. Х. Бай, В. Цзян, Г. П. Котчи, В. А. Саиди, Б. Дж. Байтэлл, Дж. М. Джарвис, А. Г. Маршалл, Р. А. С. Робинсон и А. Стар, Понимание механизма разложения оксида графена с помощью фотопреакции Фентона, *J. Phys. Chem. C*, 2014, 118, 10519.
12. Х. Чжоу, Ю. Чжан, К. Ван, Х. Ву, Ю. Ян, Б. Чжэн, Х. Ву, С. Го и Дж. Чжан, Фотопреакция Фентона оксида графена: новая стратегия подготовки графеновых квантовых точек для расщепления ДНК, *ACS Nano*, 2012, 6, 6592.
13. Г. Мастранджело, Э. Фадда и В. Марция, Полициклические ароматические углеводороды и рак у человека, *Гигиена труда и промышленная медицина*, 1997, 3, 113.
14. Ю. Фэн, К. Лу, Л. Мао, Х. Го, С. Гао и Э. Дж. Петерсен, Деградация нескольких слоев, меченных <sup>14</sup>C графен с помощью реакции Фентона: скорости реакции, характеристика продуктов реакции и потенциал экологических эффектов, *Исследования воды*, 2015, 84, 49-57.
15. Г. Ван, Ф. Цянь, К. В. Салтиков, Ю. Цзяо и Ю. Ли, Микробиологическое восстановление оксида графена методом Шеванелла, *Nano Research*, 2011, 4, 563-570.
16. Х. Рен, Дж. Ли, К. Чен, Ю. Гао, Д. Чен, М. Су, А. Алсаеди и Т. Хаят, аналоги графена в водные среды и пористые среды: диспергирование, агрегация, осаждение и трансформация, *Наука об окружающей среде: Нано*, 2018, 5, 1298-1340.
17. И. Чоудхури, М. К. Дац, Н. Д. Мансухани, М. К. Херсам и Д. Бушар, Коллоидный Свойства и стабильность наноматериалов оксида графена в водной среде, *Наука и технология в области окружающей среды*, 2013, 47, 6288-6296.
18. Л. Ву, Л. Лю, Б. Гао, Р. Муньос-Карпена, М. Чжан, Х. Чен, З. Чжоу и Х. Ван, Кинетика агрегации оксидов графена в водных растворах: эксперименты, механизмы и Моделирование, *Ленгмюр*, 2013, 29, 15174.
19. W.-С. Хоу и К. Т. Джифверт, Фотохимия водных кластеров C60: доказательства наличия 1O<sub>2</sub> Образование и его роль в фотопреобразовании C60, *наука об окружающей среде и Технология*, 2009, 43, 5257-5262.

- 1...  
2...  
3...  
4...  
5...  
6...  
7...  
9...  
10...  
31 |  
42...  
A 3  
34 4  
§ 5  
46...  
37...  
19.  
20.  
21 |  
22 22  
-23  
24 24  
25 25  
26 26  
27  
28 28  
29  
31 31  
33 33  
34 |  
35 35  
36 36  
°37  
38 38  
39...  
40...  
41...  
42...  
43...  
44...  
45...  
46...  
47...  
48  
49...  
50...  
51...  
52...  
53...  
54...  
55...  
56...  
57...  
58  
59...  
60...  
20. У. К. Хоу и К. Т. Джонс, Фотохимическое превращение водных кластеров C60 под действием солнечного света,  
*Environ. Sci. Technol.*, 2009, 43, 362.
21. У.-К. Хоу, Л. Конг, К. А. Вепасник, Р. Г. Зепп, Д. Х. Фейрбразер и К. Т. Джонс,  
Фотохимия водных кластеров C60: зависимость от длины волны и продукта  
Характеристика, Наука и технология окружающей среды, 2010, 44, 8121-8127.
22. Л. Конг, О. Тедроу, Ю. Ф. Чан и Р. Г. Цепп, Инициируемые светом превращения фуллеренола в  
водные среды, Окружающая среда. Наука. Технология., 2009, 43, 9155.
23. Ю. С. Хван и К. Л. Ли, Характеризующие фотохимическое превращение водного nC60 при  
экологически значимые условия, Экологические науки. Технол., 2010, 44, 3008.
24. Дж. Л. Биттер, Дж. Янг, С. Бейгзаде Милани, К. Т. Джонс и Д. Х. Фейрбразер, Трансформации  
окисленные многостенные углеродные нанотрубки, подвергнутые ультрафиолетовому  
облучению (254 нм), окружающая среда  
Наука: Нано, 2014, 1, 324-337.
25. К.-Ю. Чен и К. Т. Джонс, Фотореактивность карбоксилированных одностенных углеродных нанотрубок  
при солнечном свете: образование активных форм кислорода в  
воде, наука об окружающей среде и  
Технология, 2010, 44, 6674-6679.
26. С.-У. Чен и Р. Г. Цепп, Исследование фотосенсибилизации функционализированными  
углеродными нанотрубками,  
*Наука и технология об окружающей среде*, 2015, 49, 13835-13843.
27. W.-C. Hou, C.-J. He, Y.-S. Wang, D. K. Wang и R. G. Zepp, Индуцированные фотопреобразованием  
Агрегация функционализированных одностенных углеродных нанотрубок: Важность  
аморфности  
*Углерод, наука и технология окружающей среды*, 2016, 50, 3494-3502.
28. Р. Ю. Н. Генглер, Д. С. Бадали, Д. Чжан, К. Димос, К. Спайроу, Д. Гурнис и Р. Дж. Д. Миллер,  
Раскрытие сверхбыстрого процесса, лежащего в основе  
фоторедукции оксида графена, *Nature Коммуникации*, 2013, 4, 2560.
29. М. Койнума, К. Огата, Ю. Камеи, К. Хатакеяма, Х. Татэйши, Ю. Ватанабэ, Т. Танигути, К.  
Гезухара, С. Хаями, А. Фунацу, М. Саката, Ю. Кувахара, С. Курихара и Ю. Мацумото,

Фотохимическая инженерия нанолистов оксида графена, Журнал физической химии

С, 2012, 116, 19822-19827.

30. Ю. Мацумото, М. Койнума, С. Ида, С. Хаями, Т. Танигуди, К. Хатакеяма, Х. Татейши, Ю.

9... Ватанабе и С. Амано, Фотореакция нанолистовых материалов оксида

10... графена в воде, Журнал

21... А3 Физическая химия С, 2011, 115, 19280-19286.

34 4 31. У.-К. Хой, И. Чоудхури, Д. Г. Гудвин, У. М. Хендерсон, Д. Х. Фейрбразер, Д. Бушар

§ 5 916 37... и Р. Г. Цепп, Фотохимическое превращение оксида графена под воздействием солнечного света, экология

37... Наука и технологии, 2015, 49, 3435-3443.

19. 20. 21 | 32. Г. П. Котчи, Б. Л. Аллен, Х. Ведала, Н. Янамала, А. А. Капралов, Ю. Ю. Тюрина, Дж. Клейн-

22 22 -23 Ситараман, В. Е. Каган и А. Стар, Ферментативное окисление оксида графена, ACS Nano,

24 24 25 25 26 26 27 28 28 29 31... 33 33 34 | 35 35 36 36 37 38 38 39... 40... 41... 42... 43... 44... 45... 46... 47... 48 49... 50... 51... 52... 53... 54... 55... 56... 57... 58 59... 60...

2098-2108.

33. Х. Бай, У. Цзян, Г. П. Котчи, У. А. Саиди, Б. Дж. Байтэлл, Дж. М. Джарвис, А. Г. Маршалл, Р. А. С.

Робинсон и А. Стар, Понимание механизма разложения оксида графена с помощью фотопреакции Фентона, Журнал физической химии С, 2014, 118, 10519-10529.

34 | 35 35 36 36 37 38 38 39... 40... 41... 42... 43... 44... 45... 46... 47... 48 49... 50... 51... 52... 53... 54... 55... 56... 57... 58 59... 60...

34. Г. Э. Батли, Дж. К. Кирби и М. Дж. Маклафлин, Судьба и риски наноматериалов в водных и

Земная среда, Отчеты о химических исследованиях, 2013, 46, 854-862.

35. Н. И. Ковтюхова, П. Дж. Олливье, Б. Р. Мартин, Т. Э. Маллук, С. А. Чижик, Е. В. Бузанева и

40... А. Д. Горчинский, Послойная сборка ультратонких композитных пленок из микронных размеров

41... листы оксида графита и поликатионы, Химия материалов, 1999, 11, 771-778.

42... 43... 44... 45... 46... 47... 48 49... 50... 51... 52... 53... 54... 55... 56... 57... 58 59... 60...

36. И. Чоудхури, Н. Д. Мансукхани, Л. М. Гвини, М. К. Херсам и Д. Бушар, Агрегация

и стабильность восстановленного оксида графена: сложная роль двухвалентных катионов, pH и природных

Органические вещества, Наука и технология окружающей среды, 2015, 49, 10886-10893.

37. Д. В. Джонсон, Б. П. Добсон и К. С. Коулман, Перспективы производства графена

51... 52... 53... 54... 55... 56... 57... 58 59... 60...

дисперсии, Современное мнение в журнале Colloid & Interface Science, 2015, 20, 367-382.

1...  
2...  
3...  
4...  
5...  
6...  
7...  
  
38. Ю. Су, Г. Янг, К. Лу, Э. Дж. Петерсен и Л. Мао, Коллоидные свойства и стабильность водных супензий из малослойного графена: важность концентрации графена, окружающая среда Загрязнение, 2017, 220, 469-477.

9...  
10...  
21  
42...  
A3  
34 4  
§ 5  
916  
37...  
  
39. С. Станкович, Д. А. Дикин, Р. Д. Пинер, К. А. Кольхаас, А. Кляйнхаммес, Ю. Цзя, Ю. Ву, С. Т. Нгуен и Р. С. Руфф, Синтез нанолистовых материалов на основе графена путем химического восстановления отслоившийся оксид графита, Углерод, 2007, 45, 1558.

19.  
20.  
21...  
22 22  
-23  
24 24  
25 25  
26 26  
27  
28 28  
29  
31...  
33 33  
34 |  
35 35  
36 36  
°37  
38 38  
39...  
40...  
41...  
42...  
43...  
44...  
45...  
46...  
47...  
4848  
49...  
50...  
51...  
52...  
53...  
54...  
55...  
56...  
57...  
58  
59...  
60...  
  
40. Л. Дж. Кот, Ф. Ким и Дж. Хуанг, восстановление вспышки и формирование структуры оксида графита и его Полимерный композит, J. Am. Chem. Soc., 2009, 131, 1043.

41. С. Дж. Ан, Ю. Чжу, С. Х. Ли, М. Д. Столлер, Т. Эмильссон, С. Парк, А. Веламаканни, Дж. Ан и Р. С. Руфф, Изготовление тонких пленок и одновременное анодное восстановление нанесенного оксида графена тромбоциты методом электрофоретического осаждения, Журнал Physical Chemistry Letters, 2010, 1, 1259-1263.

42. Н. М. Хуан, Х. Н. Лим, К. Х. Чия, М. А. Ярмо и М. Р. Мухамад, Простая комнатная температурное получение высокоурожайного оксида графена большой площади, Международный журнал наномедицина, 2011, 6, 3443-3448.

43. К. Мэй, К. Чжан, Г. Гуань, Б. Лю, С. Ван и З. Чжан, Высокоэффективная фотолюминесценция оксида графена с настраиваемыми свойствами поверхности, Химические коммуникации, 2010, 46, 7319-7321.

44. Д. Ли, М. Б. Мюллер, С. Гилье, Р. Б. Канер и Г. Г. Уоллес, Перерабатываемые водные дисперсии графеновые нанолистники, Nat Nano, 2008, 3, 101-105.

45. Д. К. Маркано, Д. В. Косынкин, Дж. М. Берлин, А. Синицкий, З. Сан, А. Слесарев, Л. Б. Алемани, У. Лу и Дж. М. Тур, Улучшенный синтез оксида графена, ACS Nano, 2010, 4, 4806.

46. Х. Гао, Дж. Джанг и С. Нагасе, Гидразин и термическое восстановление оксида графена: реакция Механизмы, структуры продуктов и дизайн реакций, Журнал физической химии C, 2010, 114, 832-842.

47. С. Саксена, Т. Тайсон, С. Шукла, Э. Негуссе, Х. Чен и Дж. Бай, Исследование структурных и электронных свойств оксида графена, 2011.

- 1...  
2...  
3...  
4...  
5...  
6...  
7...  
9...  
10...  
21...  
42...  
A3  
34 4  
§ 5  
46...  
37...  
19.  
20.  
21...  
22 22  
-23  
24 24  
25 25  
26 26  
27  
28 28  
29  
31...  
33 33  
34 |  
35 35  
36 36  
°37  
38 38  
39...  
40...  
41...  
42...  
43...  
44...  
45...  
46...  
47...  
48  
49...  
50...  
51...  
52...  
53...  
54...  
55...  
56...  
57...  
58  
59...  
60...  
48. К. Лю, Дж.-Дж. Чжан, Ф.-Ф. Чэн, Т.-Т. Чжэн, К. Ван и Дж.-Дж. Чжу, Зеленый и легкий синтез высокобиосовместимых графеновых нанопластин и их применение для визуализации клеток и лекарственных препаратов доставка, Журнал химии материалов, 2011, 21, 12034-12040.
49. Ю. Хан, З. Ло, Л. Ювэнь, Дж. Тянь, Х. Чжу и Л. Ван, Синтез наночастиц серебра на восстановленный оксид графена при микроволновом облучении с крахмалом в качестве идеального восстановителя и стабилизатор, Прикладная наука о поверхности, 2013, 266, 188-193.
50. Ю. Чжоу, К. Бао, Л. А. Л. Тан, Ю. Чжун и К. П. Лох, Гидротермальная дегидратация для “Зеленое” восстановление расслоенного оксида графена до графена и демонстрация настраиваемых Оптические ограничивающие свойства, Химия материалов, 2009, 21, 2950-2956.
51. М. Сугиока, Взаимосвязь между поглощением УФ-излучения и структурой органических Соединения, доклад об УФ-излучении, февраль. Симадзу, 2009, 2, 5-6.
52. М. Накахара, Наука о цвете. Журнал, 2002.
53. Н. Читозе, С. Уэта, С. Сейно и Т. А. Ямamoto, Радиолиз водных растворов фенола с наночастицами. 1. Разложение фенола и удаление ТОС в растворах, содержащих TiO<sub>2</sub>, вызванное УФ, гамма-лучи и электронные пучки, Хемосфера, 2003, 50, 1007-1013.
54. К. Кабра, Р. Чаудхари и Р. Л. Соуни, Обработка опасных органических и неорганических соединения путем воднофазного фотокатализа: обзор, Промышленная и инженерная химия исследования, 2004, 43, 7683-7696.
55. Г. Р. Малпасс, Д. В. Мива, Р. Л. Сантос, Э. М. Виейра и А. Дж. Мотео, Неожиданная токсичность уменьшение при фотоэлектрохимическом разложении атразина NaCl, Окружающая среда письма по химии, 2012, 10, 177-182.
56. Д. Ли, М. Б. Мюллер, С. Гилье, Р. Б. Канер и Г. Г. Уоллес, Обрабатываемые водные дисперсии графеновых нанолистов, Нац. Нанотехнол., 2008, 3, 101.
57. Ю. Си и Э. Т. Самульски, Синтез водорастворимого графена, Нанолитература, 2008, 8, 1679-1682.

- 1...  
2...  
3...  
4...  
5...  
6...  
7...  
  
9...  
10...  
2 1  
42...  
A 3  
34 4  
§ 5  
916  
37...  
  
19.  
20.  
21...  
22 22  
-23  
24 24  
25 25  
26 26  
27  
28 28  
29  
  
31 |  
33 33  
34 |  
35 35  
36 36  
°37  
38 38  
39...  
40...  
41...  
42...  
43...  
44...  
45...  
46...  
47...  
4848  
49...  
50...  
51...  
52...  
53...  
54...  
55...  
56...  
57...  
58  
59...  
60...  
  
58. Т. Ся, Дж. Д. Фортнер, Д. Чжу, З. Ци и В. Чен, Перенос восстановленного сульфидом оксида графена в насыщенный кварцевый песок: механизмы удерживания, зависящие от катионов, Наука об окружающей среде и технология, 2015, 49, 11468-11475.
59. Ю. Ци, Т. Ся, Ю. Ли, Л. Дуань и В. Чен, Коллоидная стабильность восстановленного оксида графена материалы, приготовленные с использованием различных восстановителей, Наука об окружающей среде: Нано, 2016, 3, 1062-1071.
60. Д. Хой, К. Лю, Х. Ван, Ю. Цюань, З. Цяо, Л. Ю и С. Дин, Простой синтез графена с помощью восстановление оксида графена артемизинином в этаноле, Журнал материаловедения, 2018.
61. Т. Ф. Эмиру и Д. В. Айеле, Контролируемый синтез, характеристика и восстановление графена оксид: удобный метод крупномасштабного производства, Египетский журнал фундаментальных и прикладных наук Sciences, 2017, 4, 74-79.
62. Х. А. Бесеррил, Дж. Мао, З. Лю, Р. М. Столтенберг, З. Бао и Ю. Чен, Оценка решения-Обработанные пленки восстановленного оксида графена в качестве прозрачных проводников, ACS Nano, 2008, 2, 463.
63. Н. А. Котов, И. Декани и Дж. Х. Фендлер, Ультратонкие композиты оксид графита-полиэлектролит Подготовлено методом самосборки: Переход между проводящим и непроводящим состояниями, Совет. Матер., 1996, 8, 637.
64. М. Минелла, М. Демонтис, М. Сарро, Ф. Сорделло, П. Кальца и К. Минеро, Фотохимическая стабильность и реакционная способность оксида графена, Журнал материаловедения, 2015, 50, 2399-2409.
65. Г. В. Лоури, К. Б. Грегори, С. К. Апте и Дж. Р. Лид, Превращения наноматериалов в Окружающая среда. Журнал, 2012.
66. W.-С. Хой и С. Т. Джифверт, Фотохимическое превращение водных кластеров C60 под воздействием солнечного света, Наука и технология окружающей среды, 2008, 43, 362-367.
67. К.-Ю. Чен и К. Т. Джифверт, Роль функционализации поверхности в индуцированном солнечным светом получение активных форм кислорода одностенными углеродными нанотрубками в воде, Углерод, 2011, 49, 5099-5106.

- 1...  
2...  
3...  
4...  
5...  
6...  
7...  
9...  
10...  
31 |  
42...  
A 3  
34 4  
§ 5  
46...  
37...  
19.  
20.  
21...  
22 22  
-23  
24 24  
25 25  
26 26  
27  
28 28  
29  
31 |  
33 33  
34 |  
35 35  
36 36  
°37  
38 38  
39...  
40...  
41...  
42...  
43...  
44...  
45...  
46...  
47...  
4848  
49...  
50...  
51...  
52...  
53...  
54...  
55...  
56...  
57...  
58  
59...  
60...  
68. Г. н. р. Гюндюз, Химия, материалы и свойства поверхностных покрытий: традиционные и развивающиеся технологии, публикации DEStech, Ланкастер, Пенсильвания:, 2016.  
69. Дж. Роберт К. Нойман, 1992-2013, глава 1.  
70. М. Мохандосс, С. С. Гупта, А. Неллери, Т. Прадип и С. М. Малиеккал, Солнечно-опосредованный восстановление оксида графена, RSC Advances, 2017, 7, 957-963.  
71. Т. Милл, У. Мэби, Б. Лан и А. Баразе, Фотолиз полициклических ароматических углеводородов в вода, Хемосфера, 1981, 10, 1281-1290.  
72. М. П. Фаснахт и Н. В. Блаф, Водное фоторазрушение полициклических ароматических углеводородов, наука и технология окружающей среды, 2002, 36, 4364-4369.  
73. М. П. Фаснахт и Н. В. Блаф, Механизмы водной фотодеградации полициклических ароматических углеводородов, наука и технология окружающей среды, 2003, 37, 5767-5772.  
74. Р. Г. Цепп и П. Шлотцауэр, Фотореактивность отдельных ароматических углеводородов в воде, Многоядерные ароматические углеводороды, 1979, 141-158.  
75. А. Лерф, Х. Хе, М. Форстер и Дж. Клиновски, Пересмотр структуры оксида графита, J. Phys. Химия. B, 1998, 102, 4477.  
76. Б. Конкена и С. Васудеван, разработка водорастворимого, проводящего, фоторедуцированного Оксид графена, Журнал физической химии C, 2015, 119, 6356-6362.  
77. Дж. Лю, М. Дерсток и Л. Дай, Производные оксида графена в качестве слоев для выделения дырок и электронов для высокоеффективных полимерных солнечных элементов, Наука об энергетике и окружающей среде, 2014, 7, 1297-1306.  
78. И. Котин, И. Антонова, О. Орлов и С. Смагулова, Происхождение дырочных и электронных ловушек в графене оксид, Materials Research Express, 2016, 3, 066301.  
79. Дж. Госс и Р. Х. Петруччи, Принципы общей химии и современные приложения, Петруччи, Харвуд, Херринг, Мадура: Учебное пособие, Пирсон / Прентис Холл, 2007.  
80. Ю. Цзян, Р. Раляя, П. Ляо, П. Бисвас и Дж. Д. Фортнер, Оксиды графена в воде: оценка стабильность как функция свойств материала и природных органических веществ, Наука об окружающей среде: Nano, 2017, 4, 1484-1493.

- 1...  
2...  
3...  
4...  
5...  
6...  
7...  
81. Э. М. Хотце, Т. Фенрат и Г. В. Лоури, Агрегация наночастиц: вызовы  
Понимание  
переноса и реакционной способности в окружающей среде, *J. Environ. Qual.*, 2010, 39, 1909.  
82. Г. Т. Те Вельде, Ф. М. Бикельхаупт, Э. Дж. Беренс, К. Фонсека Гуэрра, С. Дж. ван Гисберген, Дж. Г.  
Снайдерс и Т. Циглер, Химия с АДФ, Журнал  
вычислительной химии, 2001, 22,  
931-967.  
A 3  
34 4  
§ 5  
916  
37...  
19.  
20.  
21 |  
22 22  
-23  
24 24  
25 25  
27  
28  
29  
30...  
31...  
32...  
33 33  
34 |  
35 35  
36 36  
°37  
38 38  
39...  
40...  
41...  
42...  
43...  
44...  
45...  
46...  
47...  
48 48  
49...  
50...  
51...  
52...  
53...  
54...  
55...  
56...  
57...  
58 58  
59...  
60...  
83. Х. Чжэн, Ю. Пэн, Ю. Ян, Дж. Чен, Х. Тянь, Х. Цуй и У. Чжэн, Гидротермальное восстановление  
оксид графена; влияние на комбинационное рассеяние света с усилением  
поверхности, Журнал рамановской спектроскопии,  
2017, 48, 97-103.  
84. Х. Мэй, Х. Мэн и Ф. Ву, Гидротермальный метод получения восстановленного графена  
оксид, *Физика Е: Низкоразмерные системы и наноструктуры*, 2015, 68, 81-86.  
85. Х. Фань, У. Пэн, Ю. Ли, Х. Ли, С. Ван, Г. Чжан и Ф. Чжан, Дезоксигенирование отшелушенных  
оксид графита в щелочных условиях: экологичный путь к получению  
графена, Передовые технологии  
Материалы, 2008, 20, 4490-4493.

## Список цифр

Рисунок 1 ACM-изображения GO (вверху), rGO-2h (посередине) и rGO-5h (внизу), показывающие размер распределение частиц до и после облучения. После 24 часов воздействия солнечного света GO разлагается на более мелкие хлопья, в то время как размер частиц rGO существенно не изменяется.

Рисунок 2 Анализ общего содержания органического углерода в образцах GO, rGO-2h и rGO-5h методом прямого фотолиза в течение 3 дней. Наибольшее снижение ТОС наблюдается для GO, в то время как наименьшее изменение ТОС наблюдается для rGO-5h. (Столбики ошибок указывают на одно стандартное отклонение по крайней мере из трех выборок)

Рисунок 3 Рентгеновские спектры области c1s для (a) GO (0 ч), (b) GO (72 ч), (c) rGO-2h (0 ч), (d) rGO-2h (72 ч), (e) rGO-5h (0 ч) и (f) rGO-5h (72 ч). GO подвергается заметному химическому воздействию восстановление, при котором уменьшается количество гидроксильных (C-OH) и эпоксидных (C-O-C) групп значительно после облучения в течение 72 часов, при этом существенных изменений состава в Материалах rGO не наблюдается.

Рисунок 4. Спектры оптического поглощения облученных (а) образцов GO, (б) rGO-2h, (в) rGO-5h. сдвиг основного пика с 230 нм до 270 нм в GO подразумевает восстановление решетки графена , а исчезновение пика при 300 нм указывает на удаление кислородсодержащего функциональные группы в GO. В спектрах оптического поглощения не наблюдается существенных изменений для материалов rGO после облучения.

Рис. 5. Фотографии (а) дисперсий GO, (б) rGO-2h и (в) rGO-5h до (0 ч) и после (72 ч) воздействия солнечного света. Потемневший цвет дисперсии GO после 72 часов пребывания на солнце воздействие указывает на химическое и физическое разложение. Напротив, более гидрофобные Материалы rGO образуют агрегаты в воде, уменьшая возможность фоторазложения.

1...  
2...  
3...  
4... Рисунок 6 Схема предлагаемого пути реакции для наноматериала оксида графена  
5...  
6... деградация. Выше показан GO с кислородсодержащими (гидроксильными и  
7...  
8... эпоксидными) функциональными Группы. Из-за поглощения фотонов солнечного света  
9...  
10... функциональные группы удаляются, ускоряя физическую деградацию. Ниже rGO с меньшим количеством  
21...  
42... функциональных групп подвергается меньшее разрушение, чем при аналогичном облучении.  
A3  
34 4  
§ 5  
916  
37...  
19.  
20.  
21...  
@2...  
-23  
24 24  
25 25  
26 26  
27  
28 28  
29  
31 |  
32...  
33 33  
34 |  
35 35  
36 36  
°37  
38 38  
39...  
40...  
41...  
42...  
43...  
44...  
45...  
46...  
47...  
4848  
49...  
50...  
51...  
52...  
53...  
54...  
55...  
56...  
57...  
588  
59...  
60...  
Рисунок 6 Схема предлагаемого пути реакции для наноматериала оксида графена  
деградация. Выше показан GO с кислородсодержащими (гидроксильными и  
эпоксидными) функциональными Группы. Из-за поглощения фотонов солнечного света  
функциональные группы удаляются, ускоряя физическую деградацию. Ниже rGO с меньшим количеством  
функциональных групп подвергается меньшее разрушение, чем при аналогичном облучении.

1...  
2...  
3...  
4... Рисунок 7. Энергетические профили разрушения структуры для GO (обозначается как GO2) и  
5...  
6... rGO (обозначается как GO1) с различными степенями окисления. (a) Графики поверхности  
7...  
8... потенциальной энергии для удаления гидроксильной группы из GO1 и GO2  
9...  
10... соответственно. (b) Кривая потенциальной энергии для разрыв трех связей C-C в три последовательных  
11...  
12... этапа. Здесь O - красный; H - белый; C на GO1 и GO2 - зеленый и серый соответственно.  
13...  
14...  
15...  
16...  
17...  
18...  
19...  
20...  
21...  
22...  
23...  
24...  
25...  
26...  
27...  
28...  
29...  
30...  
31 |  
32...  
33 33  
34 |  
35 35  
36 36  
°37  
38 38  
39...  
40...  
41...  
42...  
43...  
44...  
45...  
46...  
47...  
4848  
49...  
50...  
51...  
52...  
53...  
54...  
55...  
56...  
57...  
588  
59...  
60...  
Рисунок 7. Энергетические профили разрушения структуры для GO (обозначается как GO2) и  
rGO (обозначается как GO1) с различными степенями окисления. (a) Графики поверхности  
потенциальной энергии для удаления гидроксильной группы из GO1 и GO2  
соответственно. (b) Кривая потенциальной энергии для разрыв трех связей C-C в три последовательных  
этапа. Здесь O - красный; H - белый; C на GO1 и GO2 - зеленый и серый соответственно.

## Список таблиц

1...  
2...  
3...  
4... Таблица 1. Распределение наноматериалов GO и rGO по поперечным размерам на основе  
5...  
6... ACM-изображений ( $n = 70\text{-}247$  хлопьев для GO и  $n = 10\text{-}20$  хлопьев для rGO-2h и rGO-5h. Для rGO-2h и  
7...  
8... rGO-5h, поскольку эти материалы агрегируются, с помощью ACM трудно обнаружить отдельные  
9...  
10... хлопья; погрешности всегда указывайте значения стандартного отклонения, если не указано иное)

11...  
12...  
13...  
14...  
15...  
16...  
17...  
18...  
19...  
20...  
21...  
22...  
23...  
24...  
25...  
26...  
27...  
28...  
29...  
30...  
31 |  
32...  
33 33  
34 |  
35 35  
36 36  
°37  
38 38  
39...  
40...  
41...  
42...  
43...  
44...  
45...  
46...  
47...  
4848  
49...  
50...  
51...  
52...  
53...  
54...  
55...  
56...  
57...  
588  
59...  
60...  
Таблица 2 Подробные сведения о составе наноматериалов GO  
и rGO на основе спектров XPS c1s ( $n = 5$  сканирований)

## Столы

Таблица 1. Распределение наноматериалов GO и rGO по поперечным размерам на основе  
 ACM-изображений ( $n = 70\text{-}247$  хлопьев для GO и  $n = 10\text{-}20$  хлопьев для rGO-2h и rGO-5h. Для rGO-2h и  
 rGO-5h, поскольку эти материалы агрегируются, с помощью ACM трудно обнаружить отдельные  
 хлопья; погрешности

всегда указывайте значения стандартного отклонения, если не указано иное)

Образец	Боковой размер (нм)	
	0 ч	24 ч
Вперед	$180 \pm 160$	$100 \pm 50$
—		
rGO-2h	$190 \pm 150$	$210 \pm 140$
rGO-5h	$160 \pm 110$	$170 \pm 110$

Таблица 2 Сведения о составе наноматериалов GO и rGO на основе спектров XPS c1s

(n n = 5scans

	<b>Вперед</b>	<b>rGO-2ч</b>		<b>rGO-5ч</b>		
	<b>—</b>	<b>0 ч</b>	<b>72 ч</b>	<b>0 ч</b>	<b>72 ч</b>	<b>72 ч</b>
C-C		24.4 ± 1.6	47.4 ± 0.1	43.6 ± 0.5	49.2 ± 0.2	51.6 ± 0.6
C-O		39.7 ± 0.9	13.9 ± 0.1	27.2 ± 1.1	22.7 ± 1.7	15.9 ± 0.7
C = O		3.1 ± 0.2	12.1 ± 0.1	15.2 ± 0.7	5.6 ± 1.5	10.5 ± 1.5
$\pi \rightarrow * \pi$			3.3 ± 0.1	2.4 ± 0.1	4.4 ± 0.1	8.3 ± 0.1
Кислород		32.8 ± 0.4	23.4 ± 0.1	21.6 ± 0.1	18.0 ± 0.1	13.7 ± 0.1

## Цифры

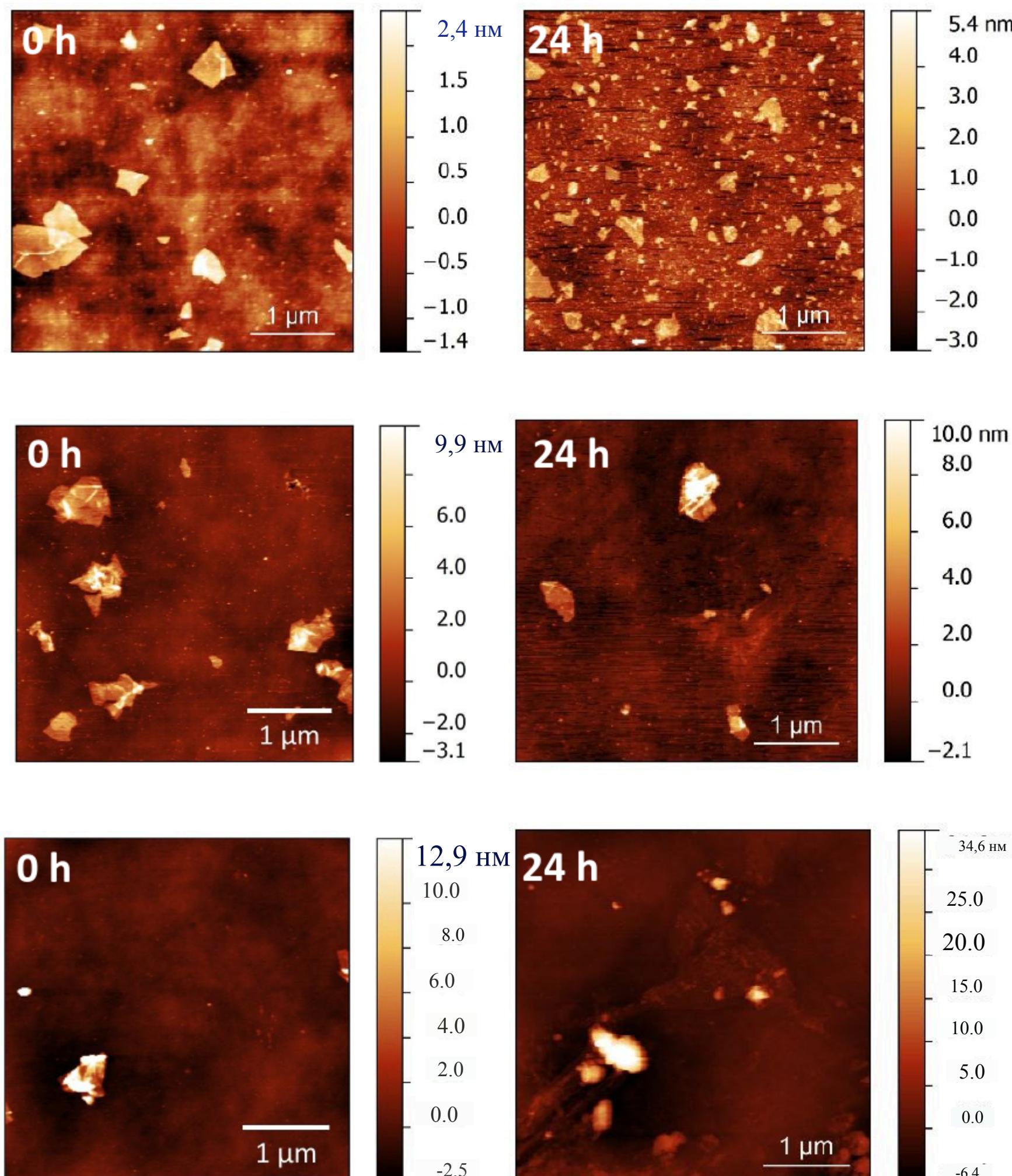


Рисунок 1. АСМ-изображения GO (вверху), rGO-2h (посередине) и rGO-5h (внизу), показывающие размер распределение частиц до и после облучения. После 24 часов воздействия солнечного света GO разлагается на более мелкие хлопья, в то время как размер частиц rGO существенно не изменяется.

1...  
2...  
3...  
4...  
5...  
6...  
7...

9...  
10...  
31...  
92...  
A 3  
34 4  
§ 5  
46...  
97...  
  
19.  
20.  
21 |  
22 22  
-23  
24 24  
25 25  
26 26  
27  
2828  
29

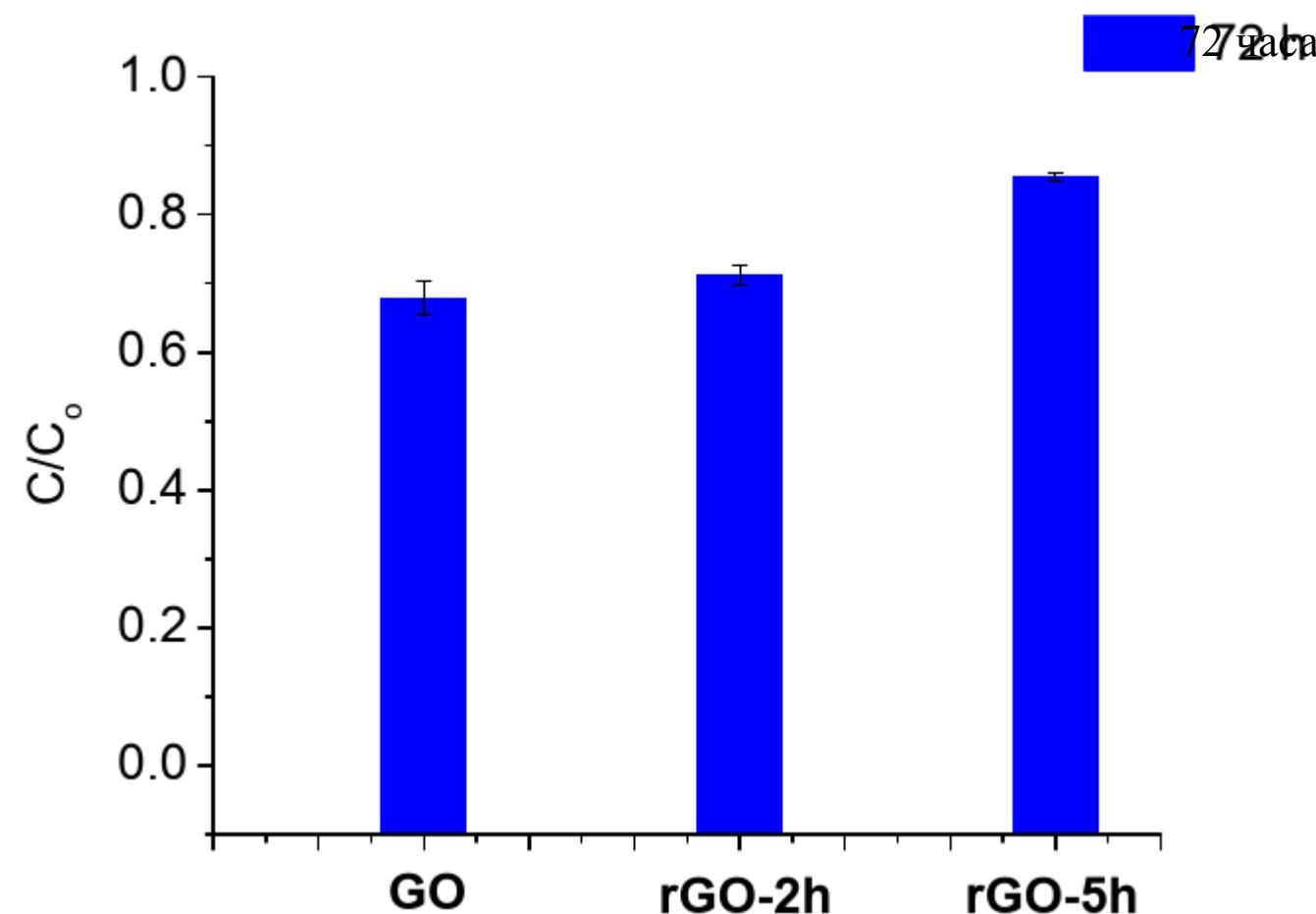


Рисунок 2. Анализ общего содержания органического углерода GO, rGO-2h, и образцы rGO-5h при прямом фотолизе

в течение 3 дней. Наибольшее снижение ТОС наблюдается для GO, в то время как наименьшее изменение ТОС составляет  
наблюдалось для rGO-5h. (Столбики ошибок указывают на одно стандартное отклонение по крайней мере для трех образцов)

4848  
49...  
50...  
51...  
52...  
53...  
54...  
55...  
56...  
57...  
58  
59...  
60...

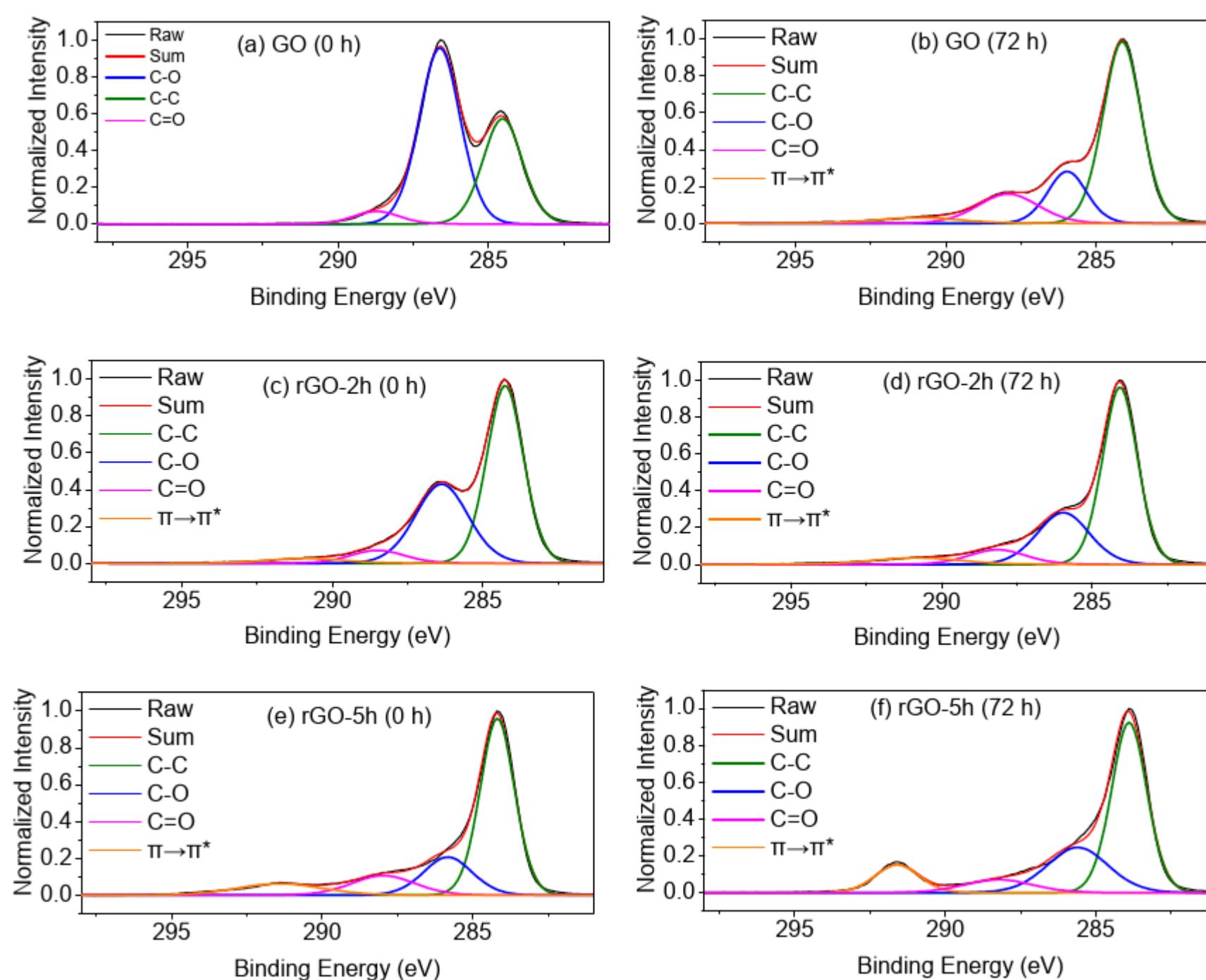


Рисунок 3. Рентгеновские спектры области c1s для (a) GO (0 ч), (b) GO (72 ч), (c) rGO-2h (0 ч), (d) rGO-2h (72 ч), (e) rGO-5h (0 ч) и (f) rGO-5h (72 ч). GO подвергается восстановление, при котором уменьшается количество гидроксильных (C-OH) и эпоксидных (C-O-C) групп заметному химическому воздействию значительно после облучения в течение 72 часов, при этом существенных изменений состава в Материалах rGO не наблюдается.

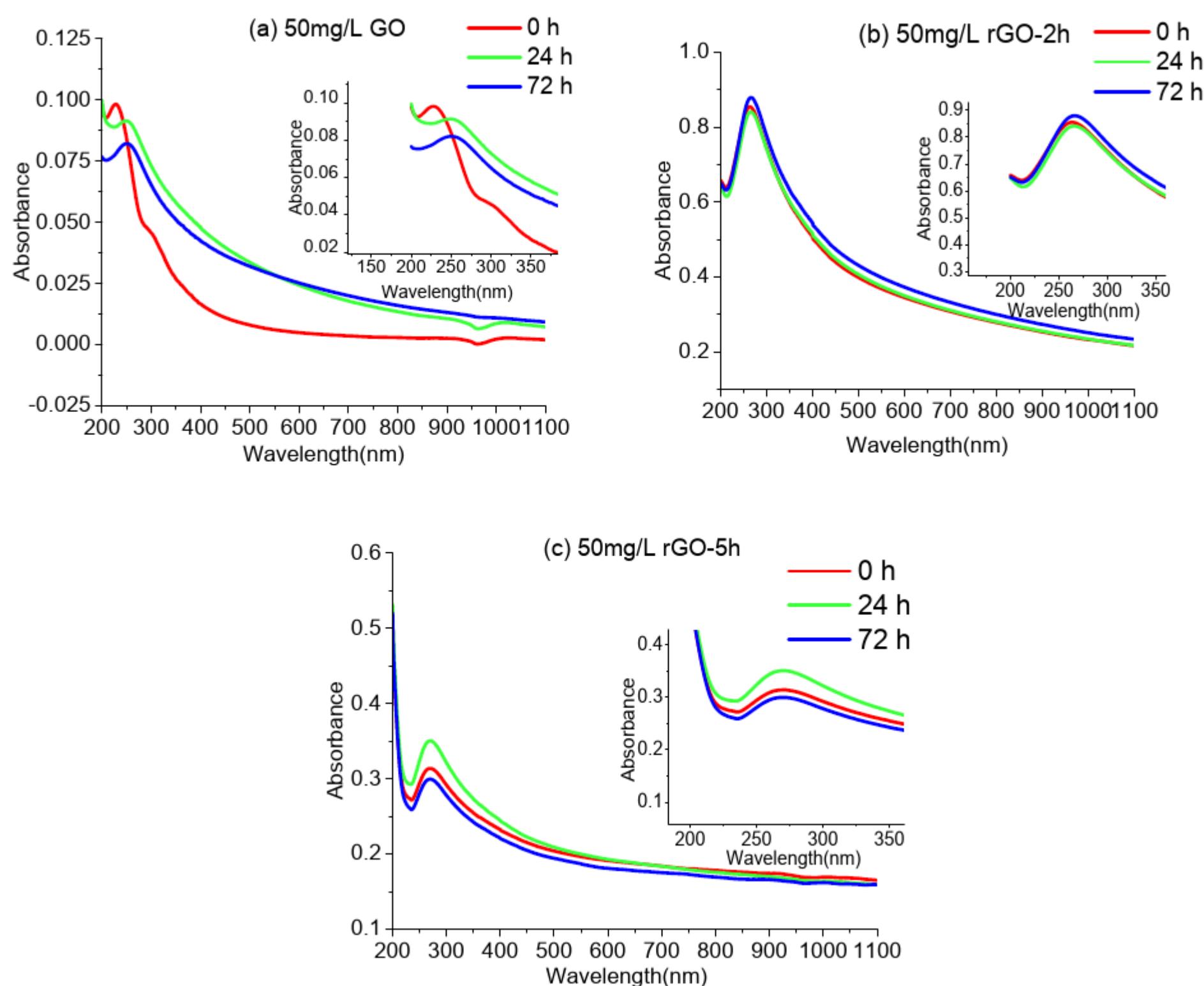


Рисунок 4. Спектры оптического поглощения облученных (а) образцов

GO (б) rGO-2h, (в) rGO-5h при 100 мВт на расстоянии 230 км при 270 ккал/г функциональных групп в GO. Существенных изменений в спектрах оптического поглощения не наблюдается.

подразумевает восстановление графена для материалов rGO после облучения.

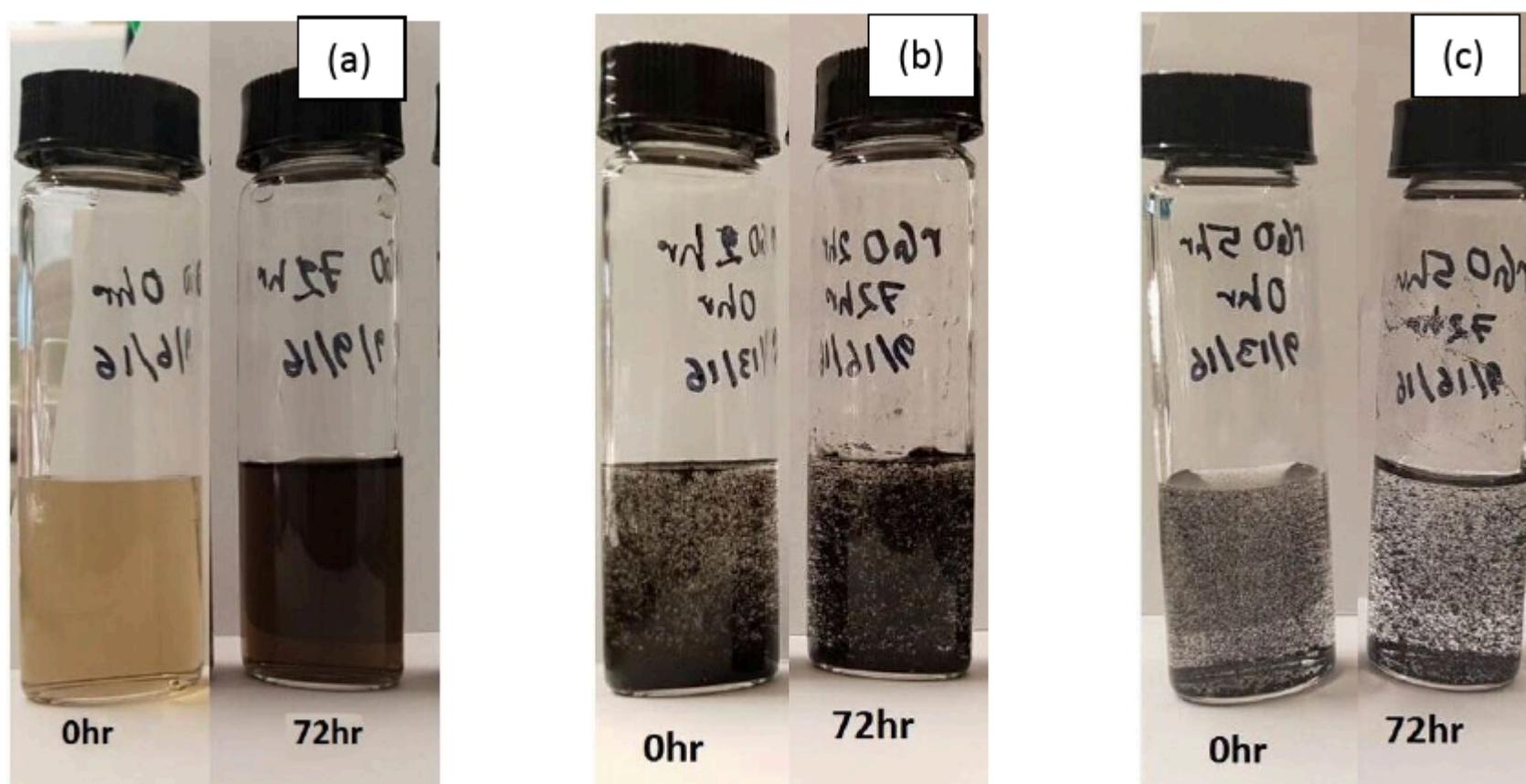


Рисунок 5. Фотографии (а) дисперсий GO, (б) rGO-2h и (в) rGO-5h до (0 ч) и после

(72 ч) воздействие солнечного света. Потемневший цвет дисперсии GO после 72 ч воздействия

солнечного света воздействие указывает на химическое и физическое разложение. Напротив, более гидрофобный

Материалы rGO образуют агрегаты в воде, уменьшение возможности фоторазложения.

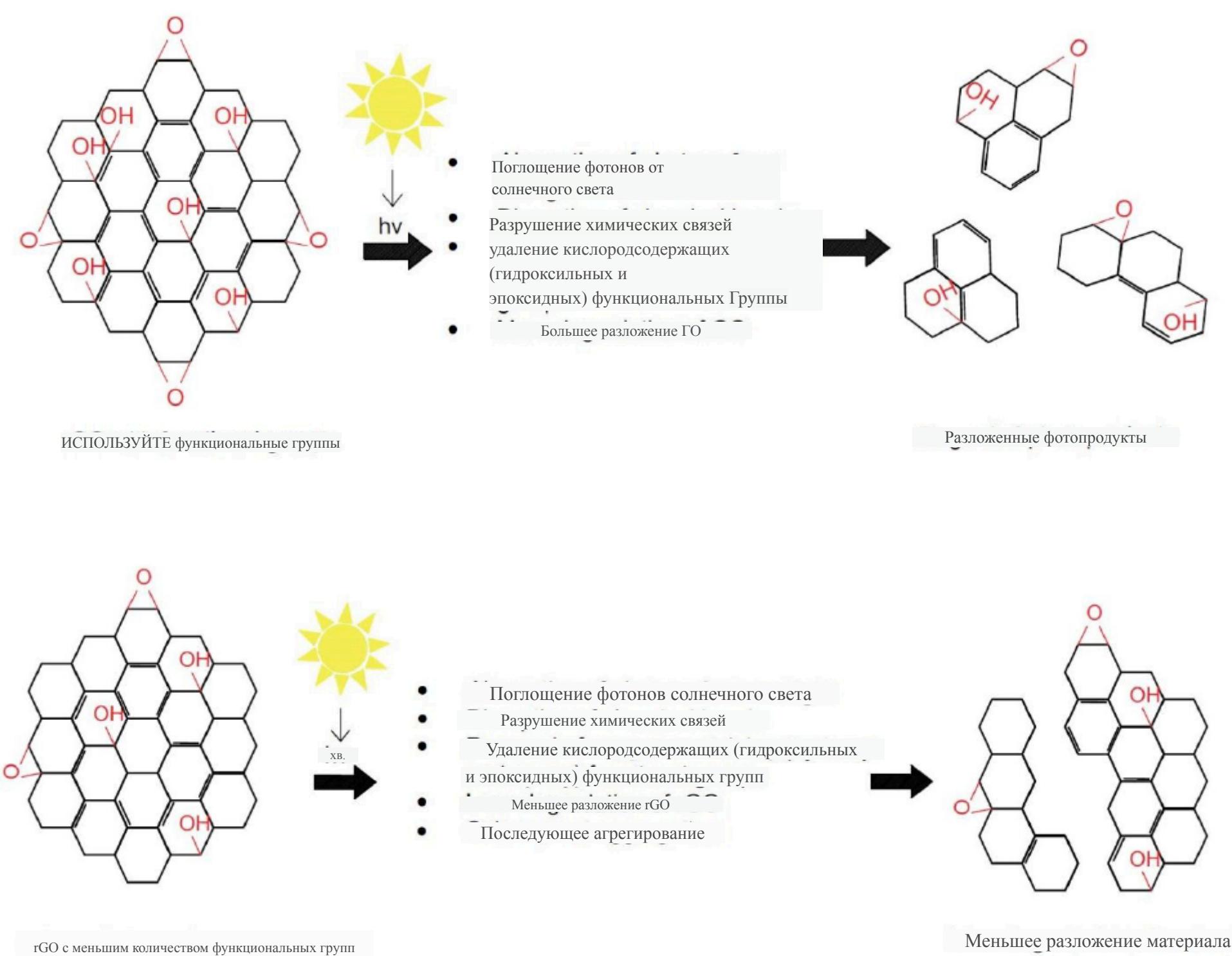
1...  
2...  
3...  
4...  
5...  
6...  
7...  
9...  
10...  
21  
92...  
A3  
34 4  
§ 5  
916  
37...19.  
20.  
21...  
22 22  
-23  
24 24  
25 25  
26 26  
27  
29  
30...  
31  
32...  
33 33  
34 |  
35 35  
36 36  
°37  
38 38  
39...  
40...  
41...  
42...  
43...  
44...  
45...  
46...  
47...  
48 48  
49...  
50...  
51...  
52...  
53...  
54...  
55...  
56...  
57...  
58 58  
59...  
60...

Рисунок 6. Схема предлагаемого пути реакции для наноматериала оксида графена

деградация. Выше показан GO с кислородсодержащими (гидроксильными и эпоксидными) функциональными

Группы. Из-за поглощения фотонов солнечного света функциональные группы удаляются, ускоряя

физическое разложение. Ниже rGO с меньшим количеством функциональных групп подвергается

меньшее разрушение, чем при аналогичном облучении.

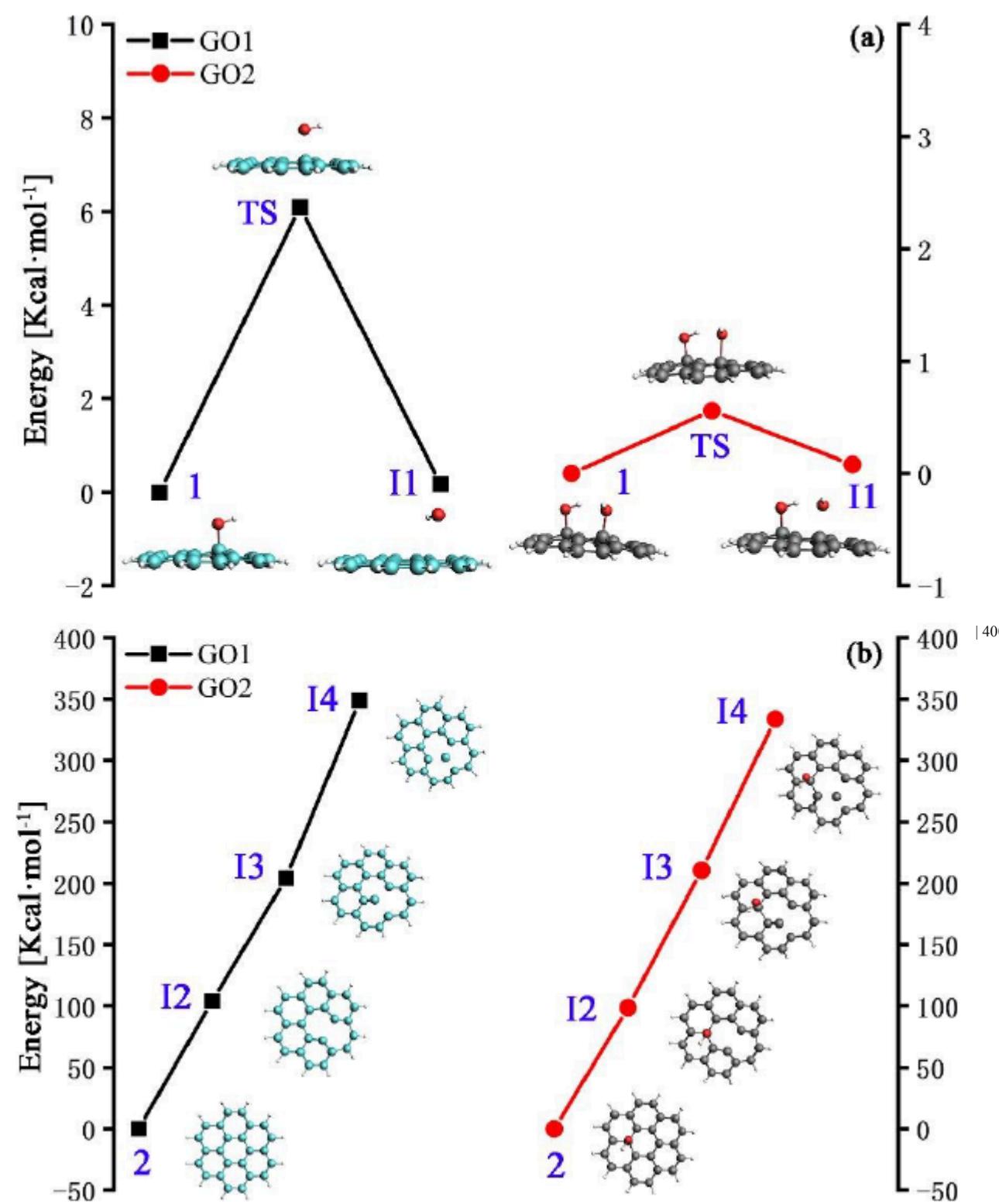


Рисунок 7. Энергетические профили разрушения структуры для GO (обозначается как GO2) и rGO (обозначается как GO1) с различными степенями окисления. (а) Графики удаление гидроксильной группы из GO1 и GO2 соответственно. (б) Кривая потенциальной энергии для поверхности потенциальной энергии для разрыв трех связей C-C в три последовательных этапа. Здесь O - красный; H - белый; C на GO1 и GO2 зеленый и серый соответственно.

## Искусство ОГЛАВЛЕНИЯ

