

## **Модуль «Наноматериалы» Лабораторный журнал**

**Целевая группа:** учащиеся 8-11 классов

**Количество участников:** 10-15 человек

**Разработчик:**

Володина М.О., аспирант химического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

### **Краткое содержание модуля**

Знакомство с многообразием наноматериалов вполне естественно начинать с углеродных материалов, так как во многом именно открытию углеродных нанотрубок проф. Ииджимой в 1991 году мы обязаны за тот невероятный нанотехнологический бум, который наблюдаем и проживаем с конца 90-х годов. Слушатели познакомятся с образцами углеродных материалов, оценят их плотность и удельную площадь поверхности, рассмотрят микрофотографии элементов микроструктуры и выстроят линейку по перспективам для конкретных функциональных свойств. Каждый узнает, чем отличаются одностенные и многостенные углеродные нанотрубки, графит и пенографит, алмаз и наноалмаз, фуллерен от углеродной сажи. Для сравнения будут рассмотрены примеры подобных наноструктур силикатов.

По стопам нобелевских лауреатов Новоселова и Гейма учащиеся смогут попробовать получить графен физическими методами и сравнить этот подход с химическим способом получения оксида графена (методы Хаммерса и Тура). На образцах оксида графена с разной степенью очистки слушатели знакомятся с методом рентгеновской флуоресцентной спектроскопии, методами рамановской спектроскопии. С помощью оптической и зондовой микроскопии учащиеся оценивают качество сформированных самостоятельно пленок оксида графена и их электропроводность. Сорбционные свойства оксида графена анализируются в сопоставлении с силикатными адсорбентами.

Занятие состоит из трех частей, каждая длительностью 90 минут с перерывом 15 минут. Занятие способствует развитию у школьников умений самостоятельно работать, придумывать новые технологии, анализировать полученные из открытых источников литературные сведения о новых материалах и технологиях. Помимо этого, занятие развивает у учащихся аккуратность и навыки обращения с простейшим лабораторным оборудованием, пленочными структурами.

Модуль является частью модульной образовательной программы для школьников 8-11 классов, интересующихся естественными науками и нанотехнологиями, с базовым уровнем подготовки по естественнонаучным дисциплинам. Модуль содержит учебные задания и ситуации, позволяющие учащимся действовать проектно и исследовательски.

## Часть 1. «Углеродные материалы. Знакомство с углеродными материалами и методами их получения»

### Шаг 1. Физические свойства наноматериалов

Каждый материал, в зависимости от особенностей состава и строения, обладает определенными свойствами, такими как электрическая проводимость, оптическая прозрачность, высокие адсорбционные свойства, легкость химической модификации, высокая твердость и многие другие. Это делает возможным применение этих материалов в чистом виде или в виде композитов в различных областях, от экологического мониторинга и очистки воды до элементов конструкционных материалов и носителей катализатора.

Получите у преподавателя карточку с названием материала ("Углеродные материалы"), описанием его структуры и свойств. Предположите, в какой области можно применять данный материал? Обсудите ваши предположения в группах и расскажите о них в рамках общей дискуссии.

---

---

---

---

---

---

---

---

### Шаг 2.

Заполните таблицу применений углеродных материалов в зависимости от их физико-химических свойств (используя коллекцию углеродных материалов).

Углеродные материалы	Особенность физико-химических свойств	Применение
Графит		
Пенографит		
Активированный уголь		
Сажа		
Алмаз		
Наноалмаз		
Углеродные нанотрубки		
Графен		
Оксид графена		

Фуллерены		
-----------	--	--

### Примечание

В рамках данной работы можно изучить некоторые физические свойства материалов, пользуясь представленным в лаборатории оборудованием:

- внешний вид
- макроскопическое состояние и шероховатость поверхности
- пористость

### Шаг 3.

Для исследуемого материала определите линейные размеры частиц и массу, внесите их в таблицу:

Название материала	
Линейные размеры, мм	
Масса, г	
Плотность, г/мм <sup>3</sup>	

По формуле  $d = \frac{m}{V}$  рассчитайте плотность материала, где  $V$  рассчитывается по одной из формул в зависимости от геометрической формы материала.

$$V_{\text{сферы}} = \frac{4}{3} \pi r^3$$

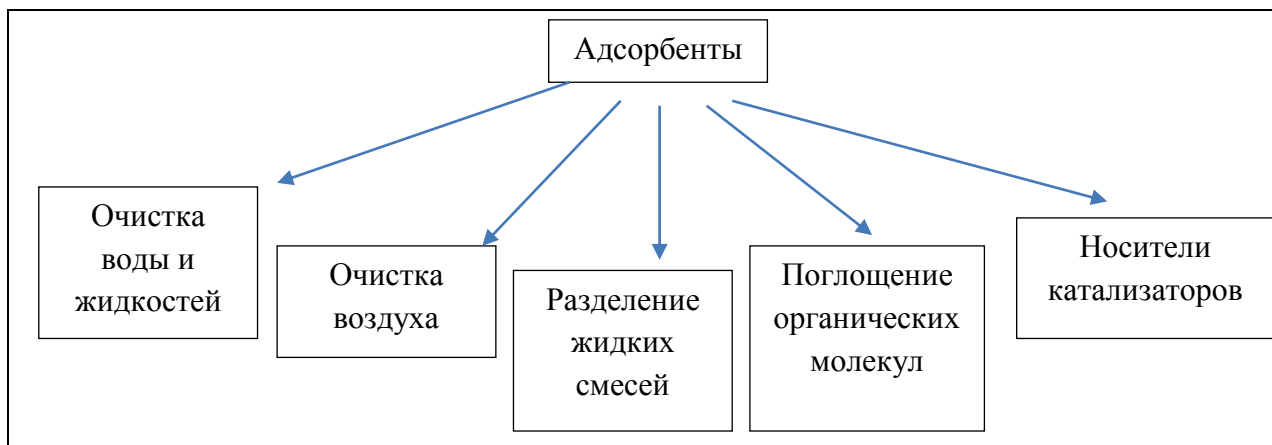
$$V_{\text{куба}} = a \cdot b \cdot h$$

$$V_{\text{цилиндра}} = h \cdot \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$$

Пользуясь оптическим микроскопом и фотоаппаратурой, получите снимки поверхности вашего материала.

Адсорбенты — высокодисперсные природные или искусственные материалы с большой удельной поверхностью, на которой происходит адсорбция веществ из соприкасающихся с ней газов или жидкостей. Адсорбенты применяют для очистки воды от металлов и примесей, в противогазах, в качестве носителей катализаторов, для очистки газов, спиртов, масел, для разделения спиртов, при переработке нефти, в медицине для поглощения газов и ядов.

Исходя из знаний о плотностях материалов и их строении, выделите из всех представленных материалов (коллекция материалов) те, которые можно использовать в качестве адсорбентов.




---



---



---



---



---



---



---

**Шаг 4.**

Прочитайте текст «Рамановская спектроскопия» (приложение 1)

**Шаг 5.**

Получите у преподавателя карточку спектра молекулы допамина. Расположите представленные в спектре пики (слайд 12) по уменьшению интенсивности в таблице. Укажите координаты пиков, подпишите оси на русском языке:

	Координата пика, см <sup>-1</sup>	Отн. интенсивность
1		1
2		
3		
4		
5		
6		
7		

### Примечание

Для того, чтобы заполнить в таблице графу «относительная интенсивность», примите за единицу интенсивность самого высокого пика, а интенсивность остальных рассчитайте по пропорции. Оцените высоту пиков с помощью линейки.

### Шаг 6<sup>1</sup>.

Получите у преподавателя карточку с рамановским спектром другого соединения и заполните для него соответствующую таблицу. Расположите пики по уменьшению значения рамановского сдвига (координаты пика):

Название соединения		
	Координата пика, см <sup>-1</sup>	Отн. интенсивность
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		

Пользуясь таблицей на слайде 13 презентации, определите, спектр какого соединения представлен на карточке.

### Шаг 7.

Пронаблюдайте за регистрацией спектров преподавателем. Какие шаги потребовали дополнительных действий? Скопируйте полученные данные для того, чтобы дома оформить спектр исследуемого соединения в нужном виде.

---

<sup>1</sup> Работа выполняется при наличии дополнительного времени

Вопросы:

Как вы думаете, зачем во время регистрации спектра выключают свет в лаборатории или закрывают прибор колпаком?

---

---

---

Какие меры предосторожности необходимо соблюдать во время работы с рамановским спектрометром?

---

---

---

Запишите модель прибора, цвет и длину волны используемого лазера.

---

---

---

Зарисуйте принципиальную схему прибора.



Что может давать вклад в базовую линию? Зачем ее нужно вычитать из спектра исследуемого соединения?

---

---

---

**Шаг 8.**

Прочитайте текст «Графен как представитель углеродных материалов» (приложение 2).

**Шаг 9.**

Попробуйте получить графен по одной из следующих методик:

**Вариант 1.** Подготовьте тонкую пластину графита, поместите ее на липкую ленту и сложите ленту вдвое. Разводя концы ленты, легко получить два кусочка

графита на ленте. Повторяйте этот процесс несколько раз, пока не будет получен достаточно тонкий слой (среди многих плёнок могут попадаться и однослойные). После расщепления скотч с тонкими плёнками графита прижимают к подложке окисленного кремния. Часть плёнок прилипает к подложке, хотя при этом трудно получить плёнку определённого размера и формы.

**Вариант 2<sup>2</sup>.** Окисленную подложку кремния покройте эпоксидным клеем (слой толщиной ~10 мкм), а затем прижмите тонкую пластинку графита к клею при помощи прессы. После удаления графитовой пластинки с помощью липкой ленты на поверхности клея остаются области с графеном и графитом.

**Шаг 10.**

Изучите полученные частицы с помощью оптического микроскопа, сделайте фотографии. Оцените линейные размеры частиц. Запишите свои наблюдения:



**Примечание<sup>3</sup>**

Альтернативным способом получения графена является сборка на атомном уровне, когда из отдельных атомов собирают листы графена.

Пользуясь информацией на слайде 18 презентации, запишите в таблице название основного метода, его особенности и прекурсоры (исходные вещества) для получения графена таким образом.

Метод	Область температур	Особые условия	Прекурсоры
-------	--------------------	----------------	------------

<sup>2</sup> Работа может быть выполнена при наличии дополнительного времени

<sup>3</sup> Работа выполняется при наличии дополнительного времени

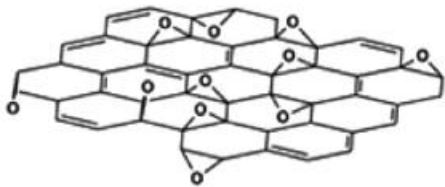
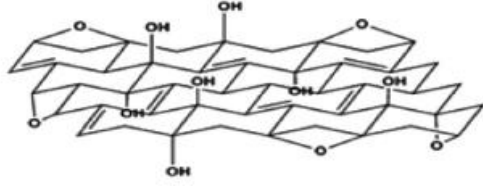
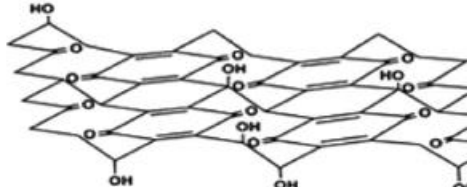
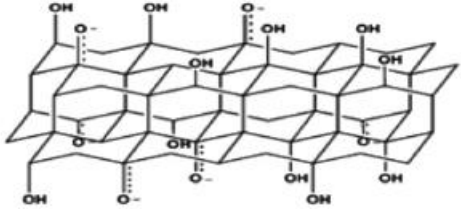
--	--	--	--

### Шаг 11.

Прочитайте текст «Оксид графена – продукт химического расщепления графита» (приложение 3)

### Шаг 12.

По предложенным вариантам структур оксида графена оцените мольное соотношение углерод-кислород.

Название	Описание	Функциональные группы	Графическое изображение фрагмента структуры
Модель Хофмана	Идеально плоская структура $sp^2$ атомов углерода, содержащая эпоксидные группы	Эпоксидные	
Модель Русса	Гофрированные углеродные листы, состоящие из транс-связанных циклогексановых колец с окисленными поверхностными группами	Эпоксидные, гидроксильные	
Модель Шольца-Бема	Кето-енольная модель	Карбонильные, гидроксильные	
Модель Накаяма-Мацуо	Гофрированная сеть $sp^3$ атомов углерода, содержащая кислородные группы на поверхности	Карбонильные, гидроксильные	



<p>Модель Лерфа-Клиновского</p>	<p>Идеально плоская структура <math>sp^2</math> атомов углерода, содержащая функциональные группы</p>	<p>Эпоксидные, гидроксильные</p>	
<p>Модель Сабо</p>	<p>Гофрированные листы графена, содержащие гидроксильные и эпоксидные группы.</p>	<p>Эпоксидные, гидроксильные</p>	

### Шаг 13.

Химические методы синтеза оксида графена основаны на окислении исходного графита смесью окислителей. Существует несколько способов синтеза, различающихся используемыми окислителями и условиями проведения реакции:

- метод Броди,
- метод Штуденмайера,
- метод Хаммерса, а также некоторые вариации этих методов.

В литературе наибольшее распространение получил модифицированный метод Хаммерса.

Изучите этот метод синтеза вместе с преподавателем, определите роль каждого из реагентов на всех стадиях синтеза (приложение 4).

Внимательно проработайте описание метода, запишите формулы реагентов, укажите условия и продолжительность синтеза.

<p>Название метода</p>	<p>Метод Хаммерса</p>
<p>Реагенты</p>	
<p>Роль каждого из соединений</p>	
<p>Температурные условия</p>	
<p>Продолжительность синтеза</p>	

Основные стадии	
Преимущества метода	
Недостатки метода	

#### Шаг 14.

Возьмите у преподавателя образцы оксида графена, полученные на разных стадиях синтеза. Опишите внешний вид образцов

Образец	Агрегатное состояние и вид	Цвет и форма	Описание
Оксид графенанецентрифугированный			
Оксид графена после центрифугирования			
Оксид графена (сушка на воздухе)			
Оксид графена (сублимационная сушка)			

#### Шаг 15. Подведение итогов работы

Ответьте на сформулированные вопросы

Напишите, что понравилось на занятии (информация, формы работы, выступления сверстников)	
--	--

Напишите, что вызвало затруднения	
Напишите, что было интересным, необычным. Что хотелось бы узнать более подробно. Чему хотелось бы специально научиться.	

**Домашнее задание<sup>4</sup>**

Постройте спектр комбинационного рассеяния, который был получен на занятии

---

<sup>4</sup> Домашнее задание предлагается в том случае, если у школьников есть время и возможность его выполнения.

## Часть 2. «Анализ наноматериалов»

### Шаг 1.

Существует большое количество *методов анализа наноматериалов*, их физико-химических свойств. В таблице представлены некоторые методы анализа и характеристики, которые они позволяют определить. Дополните таблицу, обсудив свои предположения в группах и с преподавателем:

Свойство	Характеристика	Метод анализа	Область применений	Пример материала
Электрическая проводимость	Электропроводность	Электрохимия		
Оптические свойства	Способность к неупругому рассеянию, идентификация соединений	Рамановская спектроскопия		
Оптические свойства	Оптическое поглощение, цвет образца, положение пика плазмонного резонанса	Оптическая спектроскопия (поглощение и отражение)		
Адсорбционные свойства	Удельная площадь поверхности и размер пор	БЭТ		
Функциональные группы на поверхности материала	Элементный состав поверхности	РФЭС		
Изотропность и анизотропность частиц	Линейные размеры и форма частиц	ПЭМ и РЭМ		
Способность к разложению	Состав образца	Термогравиметрия		

### Шаг 2.

На этом шаге работы мы займемся получением тонких пленок из оксида графена

Для дальнейших исследований необходимо получить тонкие пленки из оксида графена. Для этого подготовьте рабочее место и изучите методику лабораторной работы:

Цель работы: получение тонких пленок из оксида графена нанесением на подложки (покровное стекло, фильтровальная бумага, алюминиевая фольга)

Реагенты: суспензия оксида графена

Оборудование: чашки Петри большого диаметра, дозатор 50-100 мкл, наконечники для дозатора, пинцет, алюминиевая фольга, фильтровальная бумага, покрывное стекло, ножницы, маркер, фен

Ход работы:

Подготовьте рабочее место. Приготовьте подложки удобных формы и размера (по 3 шт для каждого материала подложки), поместите их в подписанные заранее чашки Петри.

Установите необходимый объем (~50 мкл) на дозаторе, наденьте наконечник и отберите аликвоту суспензии оксида графена, держа дозатор строго вертикально.

Поместите раствор капель в центр подложки и поставьте чашку Петри под горячий обдув (для ускорения процесса высушивания).

Повторите процедуру несколько раз, пока визуально не появится сплошная пленка из оксида графена.

### Шаг 3.

Оцените время высушивания пленок. На каком носителе пленки высохли быстрее всего?

---

---

---

Каким образом можно увеличить скорость высушивания пленок?

---

---

---

Как улучшить качества пленок, увеличив их сплошность?

---

---

---

### Шаг 4.

Рассмотрите полученные пленки в оптический микроскоп и среди них выберите пленку с лучшими показателями по сплошности. Сделайте фотографии.

### Шаг 5.

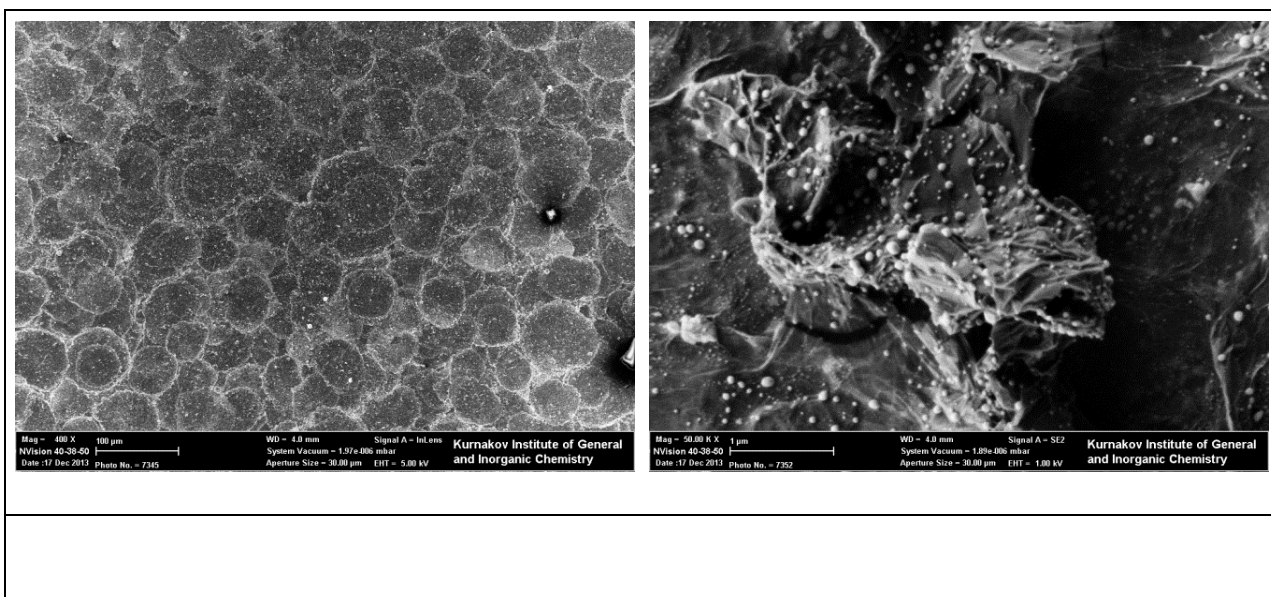
Помимо оптического микроскопа для исследования образцов ученые используют также электронную микроскопию, в частности, просвечивающую электронную микроскопию и растровую электронную микроскопию. Пользуясь информацией, полученной от преподавателя и представленной на слайдах 25 и 26, зарисуйте принципиальную схему работы ПЭМ и РЭМ:

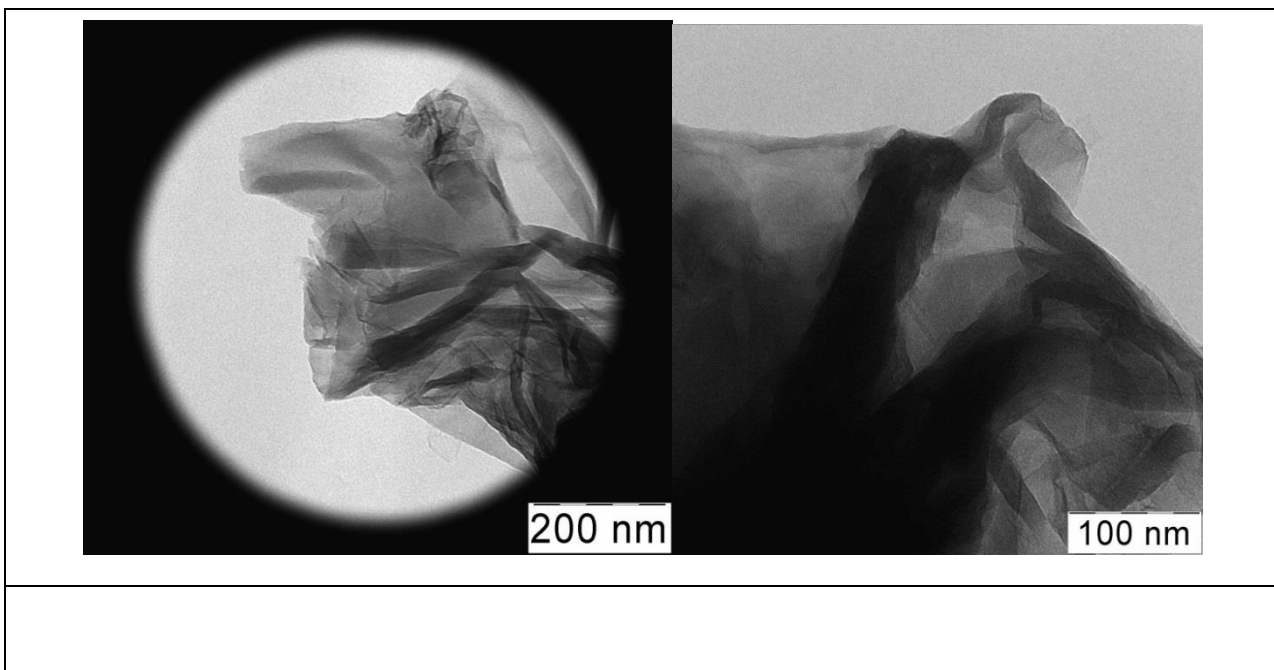
	ПЭМ	РЭМ
Принципиальная схема работы		

Какую информацию об образце можно получить?		
Какие объекты можно изучать с помощью таких методов?		

### Шаг 6.

Рассмотрите примеры ПЭМ и РЭМ изображений, подпишите их.





**Шаг 7.**

Регистрация рамановских спектров полученных образцов

Для полученных скотч-методом образцов графена и высушенных пленок оксида графена получите рамановские спектры. Будьте аккуратны при съемке спектров, соблюдайте меры предосторожности по работе с лазером, обязательно наденьте защитные очки.

Есть ли различия в виде спектров для разных образцов? Укажите сходства и различия.

---



---



---

**Шаг 8.**

Зафиксируйте положения D и G-мод, укажите их координаты и относительную интенсивность:

Образец	D-мода		G-мода	
	Координата	Интенсивность	Координата	Интенсивность
Графен				
Оксид графена				

Скопируйте полученные данные для того, чтобы самостоятельно построить графики дома.

**Шаг 9.** Подведение итогов работы

Ответьте на сформулированные вопросы

Напишите, что понравилось на занятии (информация, формы работы, выступления сверстников)	
Напишите, что вызвало затруднения	
Напишите, что было интересным, необычным. Что хотелось бы узнать более подробно. Чему хотелось бы специально научиться.	

### **Домашнее задание<sup>5</sup>**

Постройте спектры комбинационного рассеяния для образцов графена и оксида графена.

### **Часть 3. «Функциональные материалы на основе оксида графена»**

#### **Шаг 1<sup>6</sup>.**

Представьте результаты своей домашней работы. Обсудите, у кого, что получилось. Кто с кем согласен или не согласен.

#### **Шаг 2.**

Прочитайте текст:

Уникальные свойства оксида графена:

- простота получения «мокрыми методами»
- большая площадь поверхности
- легкость направленной химической модификации
- большое количество кислородсодержащих групп на поверхности

---

<sup>5</sup> Домашнее задание предлагается в том случае, если у школьников есть время и возможность его выполнения.

<sup>6</sup> Домашнее задание предлагается в том случае, если у школьников есть время и возможность его выполнения.



- монослой углерода

Благодаря всем этим свойствам оксид графена может быть использован в различных функциональных материалах. Он может быть модифицирован наночастицами благородных металлов для создания материалов с уникальными оптическими свойствами, может служить компонентом сложных многокомпонентных материалов для солнечных батарей, элементом электрохимических сенсоров, избирательным адсорбентом на определенные типы молекул (гидрофильных или гидрофобных) и многих других.

**Шаг 3. Электропроводность оксида графена**

С помощью тестера определите значение проводимости для пленок из оксида графена и сравните с известными данными для промышленных образцов.

---

---

---

---

**Шаг 4.**

Адсорбционные свойства оксида графена

Оцените сорбционные свойства оксида графена, добавляя к суспензии оксида графена аликвоты красителя при перемешивании. Какое максимальное количество вещества красителя оксид графена смог сорбировать?

---

---

---

**Шаг 5.**

Проведите аналогичный эксперимент для активированного угля. Для этого 1-2 таблетки активированного угля поместите в пробирку, добавьте 10-15 мл дистиллированной воды и при перемешивании по каплям добавляйте раствор красителя. Какое количество красителя активированный уголь смог сорбировать?

---

---

---

**Шаг 6.**

Проведите аналогичный эксперимент для Энтеросгеля. Какой материал показал лучшие результаты? Почему?

---

---

---

**Шаг 7.**

Результаты экспериментальной работы

Зафиксируйте основные результаты работы, сделайте выводы:

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Оформите результаты в виде слайдов презентации<sup>7</sup>.

**Шаг 8. Подведение итогов работы**

Ответьте на сформулированные вопросы

Напишите, что понравилось на занятии (информация, формы работы, выступления сверстников)	
Напишите, что вызвало затруднения	
Напишите, что было интересным, необычным. Что хотелось бы узнать более подробно. Чему хотелось бы специально научиться.	

---

<sup>7</sup> Данный вид работы предлагается при условии наличия времени.

**Рамановская спектроскопия** (или спектроскопия комбинационного рассеяния) – это метод анализа неорганических и органических веществ и материалов, который основан на способности систем к неупругому рассеянию монохроматического света.

На образец анализируемого материала направляется монохроматическое излучение (лазер с определенной длиной волны) и затем на детекторе регистрируется рассеянное излучение, которое при контакте с материалом изменило не только направление, но и частоту колебаний (так называемое неупругое рассеяние, или рамановское рассеяние). В зависимости от функциональных групп и связей, присутствующих в исследуемой системе, на детектор попадают только колебания с определенными длинами волн. Каждая из них несет информацию о колебаниях определенной группы атомов.

Часто называют этот набор длин волн (или частот) «паспортом» молекулы. Графически их изображают в виде графика (или спектра), где по оси x отложены значения рамановского сдвига (разница между частотой колебаний исходного лазера и частотой рассеянного излучения), а по оси y – интенсивность (число фотонов данной частоты, попавших на детектор). Такие графики называют рамановскими спектрами (спектрами комбинационного рассеяния), и выглядят они следующим образом:

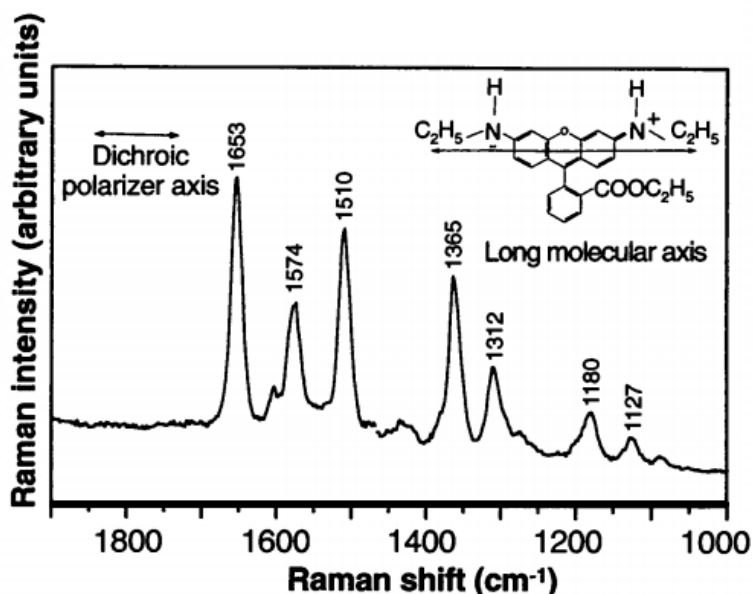


Рисунок 1. Спектр комбинационного рассеяния молекулы родамина 6G. [1]

Такие спектры позволяют идентифицировать неизвестные даже неизвестные вещества, поскольку спектр каждой молекулы уникален.

**Примечание**

Регистрация рамановских спектров проводится на специальном приборе, называемом «рамановский спектрометр», и включает в себя следующие шаги:

- проведение пробоподготовки (нанесение исследуемого образца на подложки или помещение в вials);
- подготовка оборудования (стекла, пинцет, скотч);
- подготовка прибора (прогрев лазера);

- регистрация фонового спектра;
- регистрация спектра исследуемого вещества (при этом спектр с одного образца снимают несколько раз);
- сохранение данных;
- выключение прибора;
- обработка полученных данных, оформление спектров.

## Графен как представитель углеродных материалов

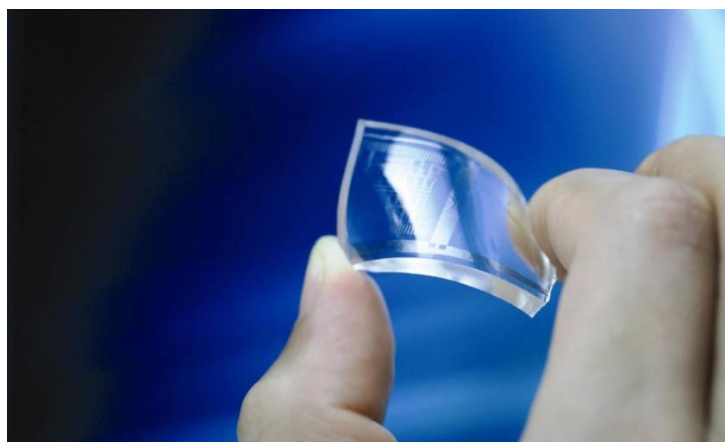
Графен можно считать одной из достаточно недавно открытых аллотропных модификаций углерода. Хотя фуллерены были открыты в 1980-х гг, а нанотрубки – в 1990-х, впервые графен был получен в 2004 году научной группой Андрея Гейма с помощью микромеханического расщепления графита [2].

Идеальный графен представляет собой двумерную сетку гексагонально расположенных  $sp^2$ -гибридизованных атомов углерода толщиной в один атом, которая существует не в качестве части углеродного материала, а находится в "свободном" состоянии: в виде суспензии или на подложке.



Графеновый слой – двумерная сетка гексагонально расположенных  $sp^2$ -гибридизованных атомов углерода толщиной в один атом, которая является структурным блоком 3D-углеродного материала.

Несмотря на столь малую толщину, лист графена на ряде подложек может быть виден в обычный оптический микроскоп. Электронные свойства графена нельзя рассматривать с точки зрения теории электронного строения металлов, однако он обладает некоторыми свойствами металлов. Графен очень устойчив к введению посторонних примесных атомов в свою решетку, которые выступают в качестве специфических легирующих добавок, и он также хорошо проводит электрический ток, с меньшими потерями энергии, чем кремний и медь. Графен является одним из самых прочных материалов, для которых когда-либо был измерен модуль Юнга, и сравним по прочности с алмазом.



Уникальные электронные и физические свойства графена делают его перспективным материалом для широкого диапазона применений. Он потенциально может заменить уже существующие материалы, а также найти приложения в хранении энергии, создании электрических схем, молекулярных сенсоров в газах, жидкостях, как компонент биосенсоров.

### Оксид графена – продукт химического расщепления графита

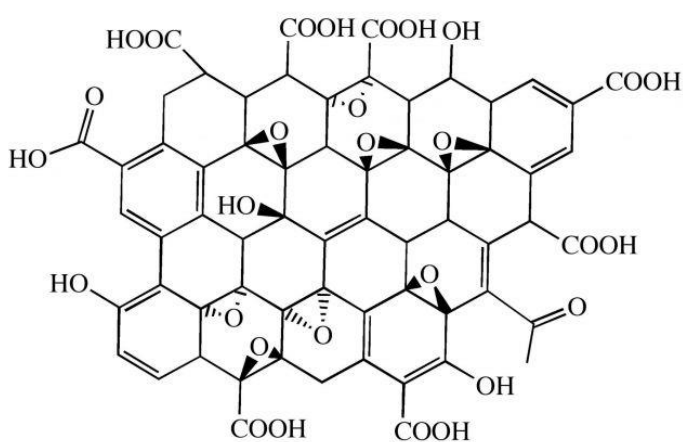
Несмотря на огромный потенциал практического использования графена, существует несколько проблем, решение которых остается актуальной задачей. Среди них, во-первых, поиск методов синтеза графена для крупномасштабного производства, поскольку бездефектный идеальный графен, получаемый микромеханически или методами эпитаксиального роста из карбида кремния, на подложках металлов и CVD, получают в малых количествах с использованием специальных условий и реагентов.

Химически достаточно легко получать производное графена – его оксид. Его можно получать в больших количествах из графита: на первой стадии расщепляя графит и интеркалированный графит ультразвуком в различных растворителях или проводя его химическое окисление.

Полученный химическим методом оксид графена имеет на поверхности различные кислородсодержащие группы, такие как гидроксильные, карбоксильные и эпоксидные, а также содержит структурные дефекты. Наличие функциональных групп делает возможной химическую модификацию оксида графена: к его поверхности можно пришить различные органические молекулы или даже наночастицы и квантовые точки.

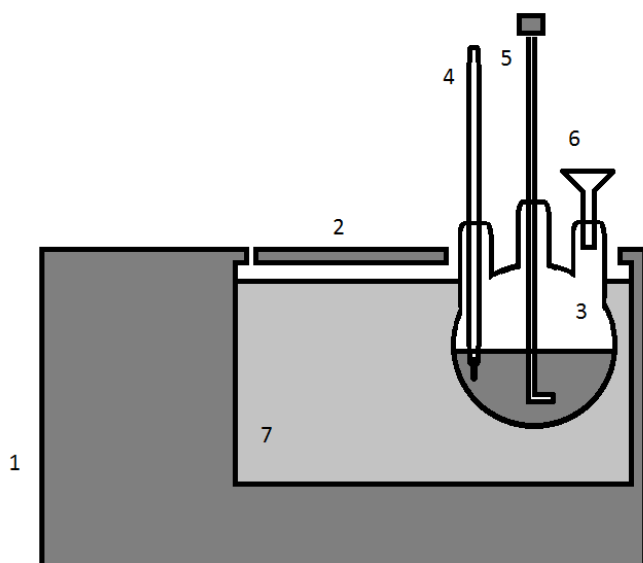
Кроме того, оксид графена уже не является идеально плоской молекулой, его листы гофрированные, что значительно увеличивает площадь поверхности этого материала и позволяет использовать в качестве адсорбента.

Оксид графена является нестехиометрическим соединением, и его состав зависит от условий синтеза. Точные состав и структура оксида графена не установлены, несмотря на множество исследований в этой области. Однако было выдвинуто различные структурные модели, соответствующие идеальной формуле  $C_8O_2(OH)_2$ .



### Синтез оксида графена модифицированным методом Хаммерса

Для синтеза оксида графена в трехгорлую колбу, оснащенную термометром и механической мешалкой, помещают 3 г графита, 1,5 г  $\text{NaNO}_3$  и 69 мл концентрированной  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и погружают ее в термостат при  $t \approx 4^\circ\text{C}$ . При интенсивном перемешивании в течение нескольких часов добавляют 9 г  $\text{KMnO}_4$ , следя за тем, чтобы температура реакционной смеси не поднималась выше  $20^\circ\text{C}$ . Затем реакционную смесь нагревают до  $35^\circ\text{C}$  и в течение 30 минут медленно смешивают с 140 мл  $\text{H}_2\text{O}$ , не допуская нагрева смеси выше  $70^\circ\text{C}$ . Горячую суспензию выдерживают при этой температуре еще 15 мин и разбавляют до 480 мл дистиллированной водой.



Установка для синтеза оксида графена:

- 1 – программируемый термостат;
- 2 – крышка термостата;
- 3 – трехгорлая колба,
- 4 – термометр;
- 5 – механическая мешалка;
- 6 – стеклянная воронка,
- 7 – емкость с антифризом

Затем колбу вынимают из термостата и закрепляют на штативе. Избыток  $\text{KMnO}_4$  и  $\text{MnO}_2$  восстанавливают 200 мл  $\text{H}_2\text{O}_2$  (3%). Полученную суспензию желто-коричневого цвета оставляют на ночь. Затем разделяют на пробирки по 50 мл, центрифугируют (6000 об/мин, 5 мин) и промывают дистиллированной водой. Процедуру повторяют трижды. Полученную суспензию оксида графена коричневого цвета хранят в закрытой посуде без доступа воздуха и света.