

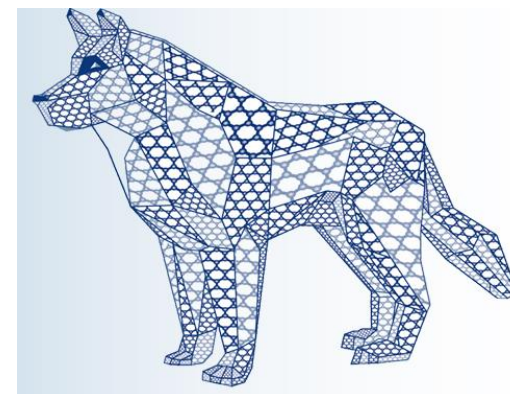
Графен: спустя 15 лет после Нобелевской премии. Прошлое, настоящее и будущее

Возняковский А.А., Возняковский А.П., Кидалов С.В., Подложнюк Н.Д.,
Калашникова Е.И., Овчинников Е.В.

лаборатория физики кластерных структур ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН



23.09.2025





Графен 15 лет назад. Или раньше?

Принято считать точкой отсчета для ГНС 2004 год – год публикации знаковой работы К. Гейма и Н. Новоселова. Однако, история графеновых наноструктур гораздо старше.



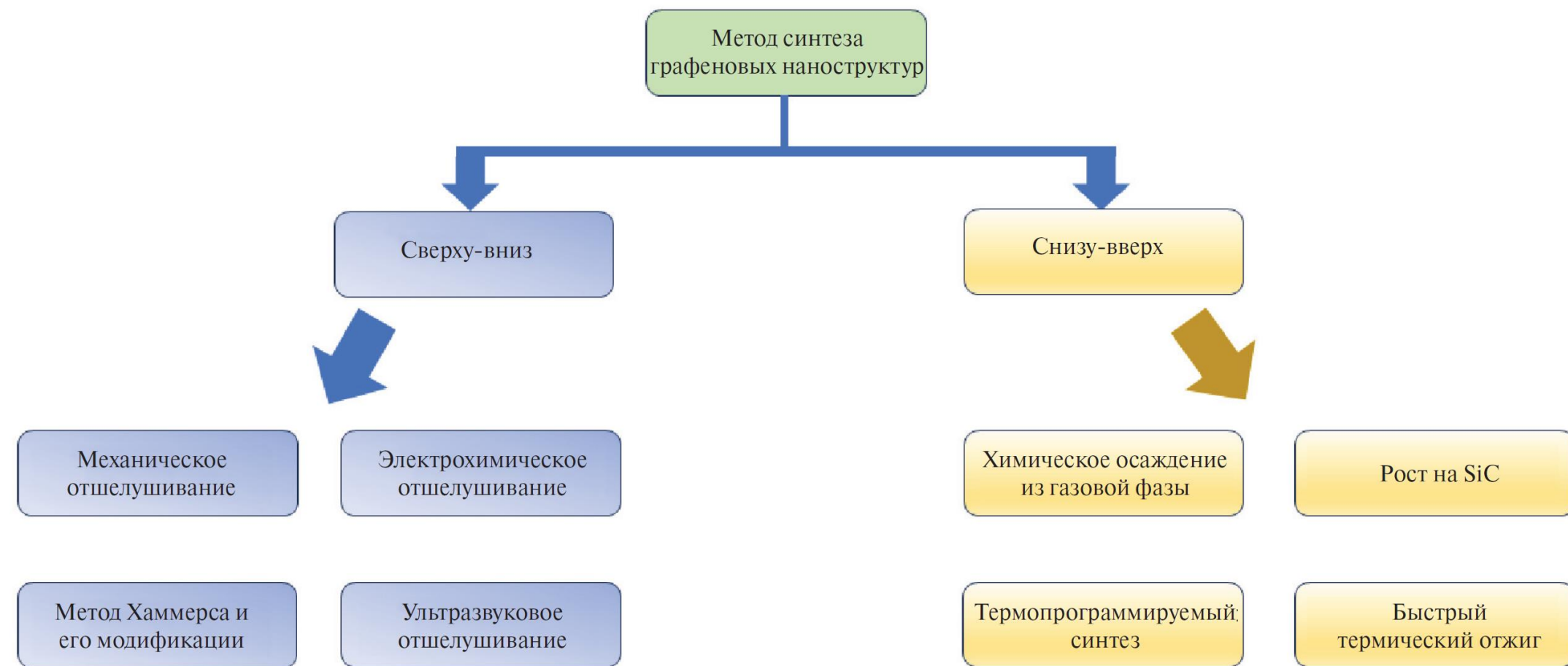
Графит+сильные кислоты=
графеновые наноструктуры (оксид графена)



Важность работы К. Гейма и Н. Новоселова не в получении графена как материала, а в “за передовые опыты с новым двумерным материалом - графеном”



Существующие методики синтеза графеновых наноструктур



Существующие методики синтеза не позволяют синтезировать большие объемы ГНС высокого качества с приемлемой себестоимостью

Объем рынка на 2022 год **200-500 млн. \$**

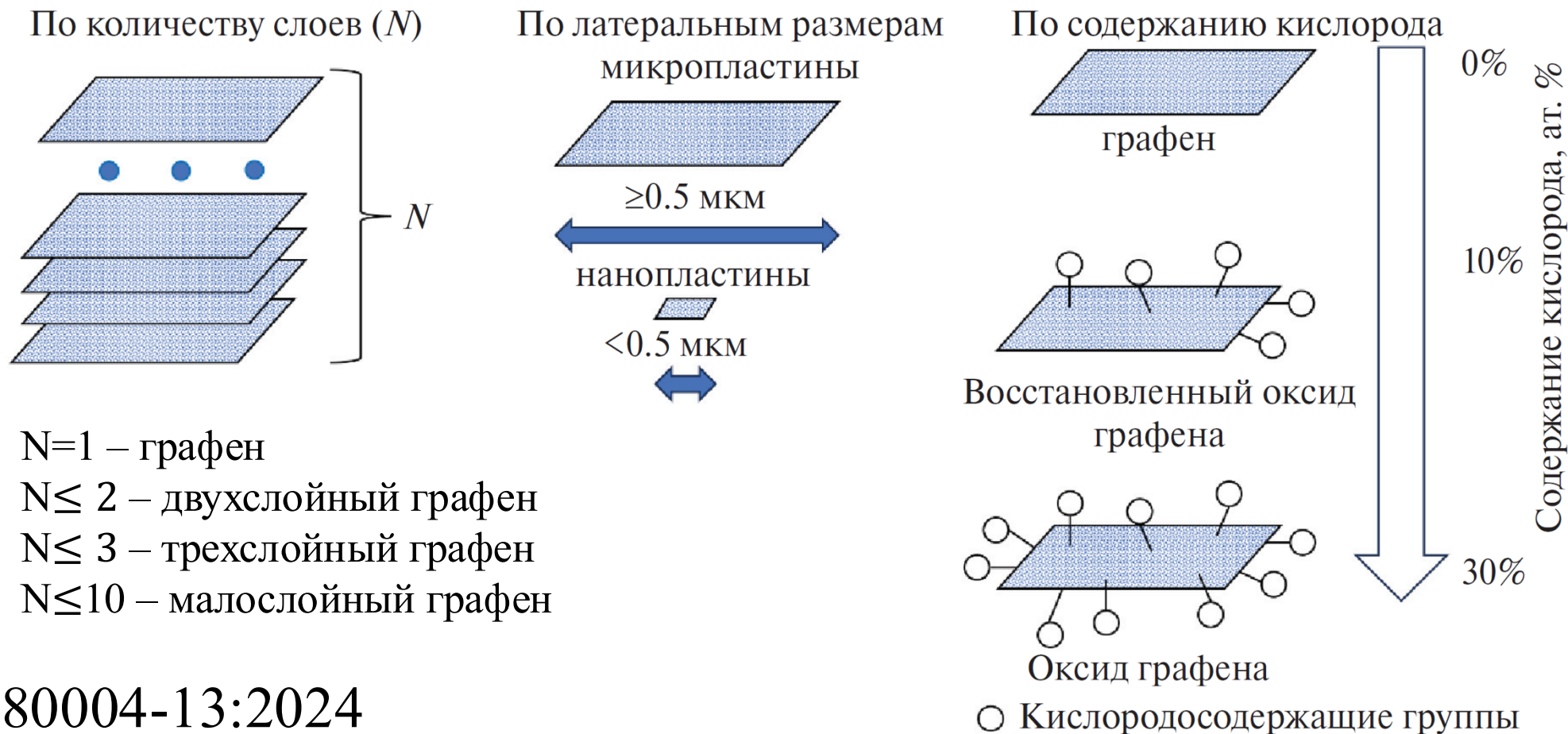
К 2030 году составит **1,802 млрд. \$**

Нужны новые методики синтеза

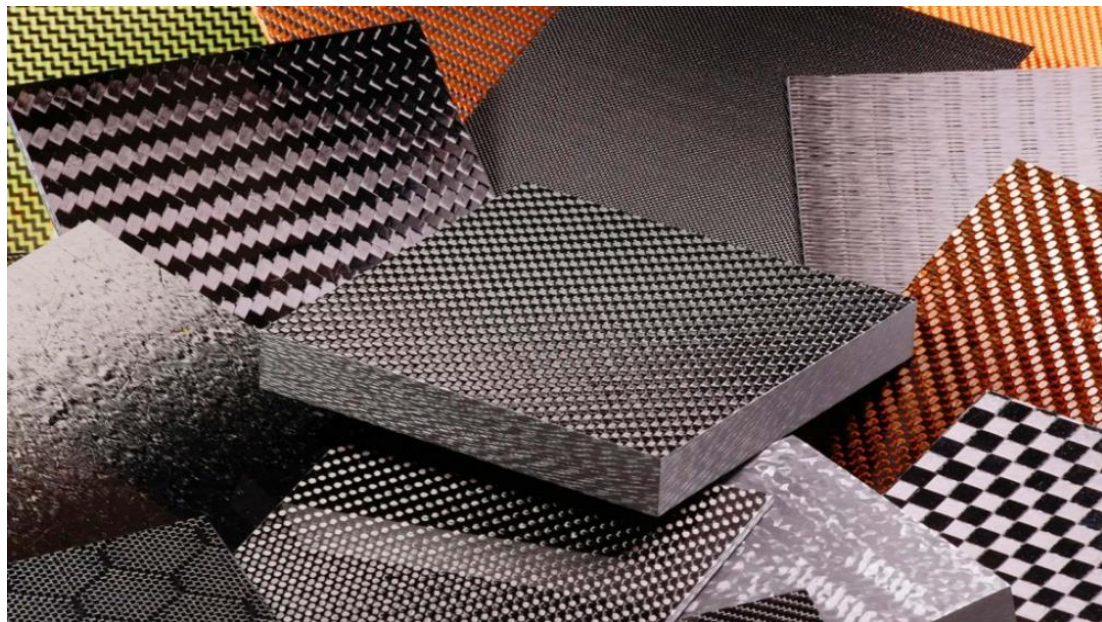


Теплопроводность **до 5000 Вт/(м*К)**

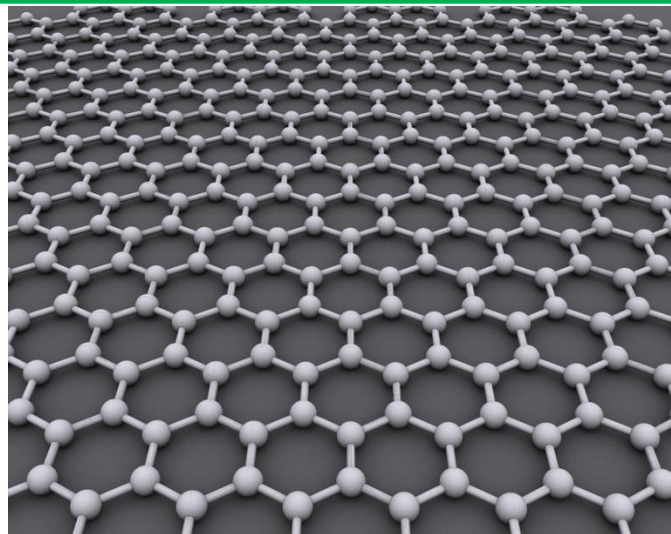
Модуль Юнга **до 2 ТПа**, предел прочности **до 130 ГПа**



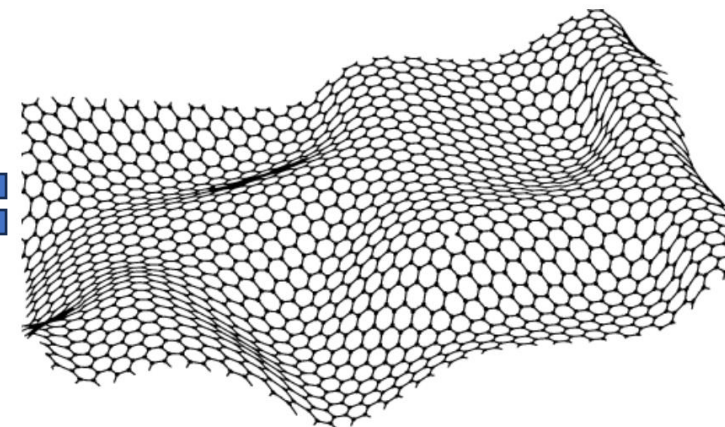
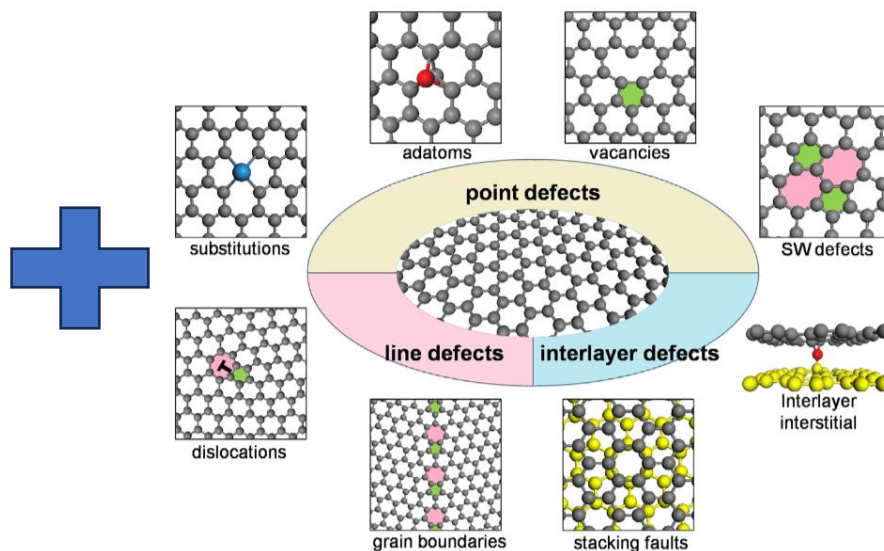
ISO/TS 80004-13:2024



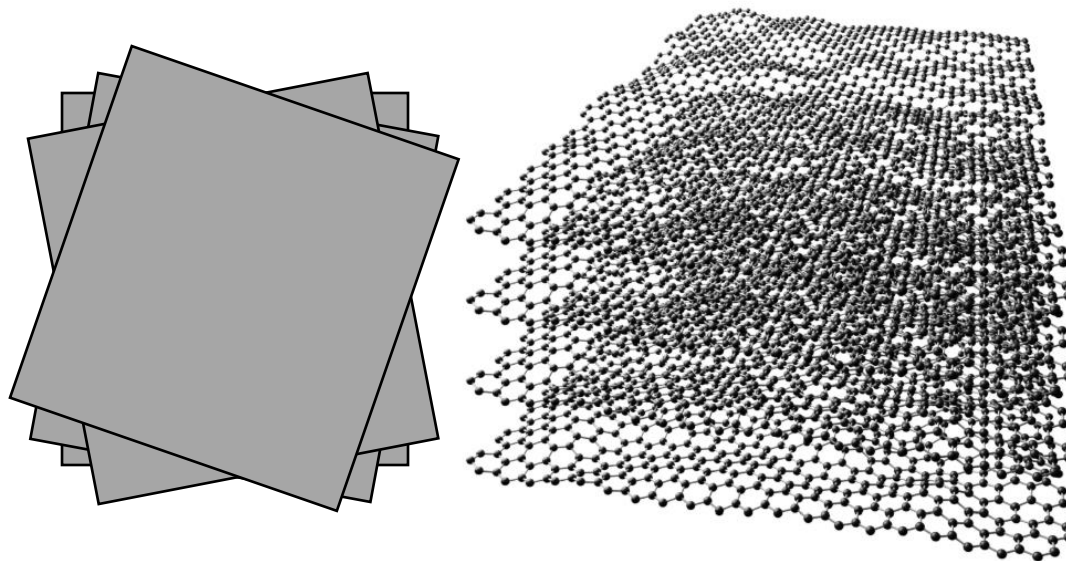
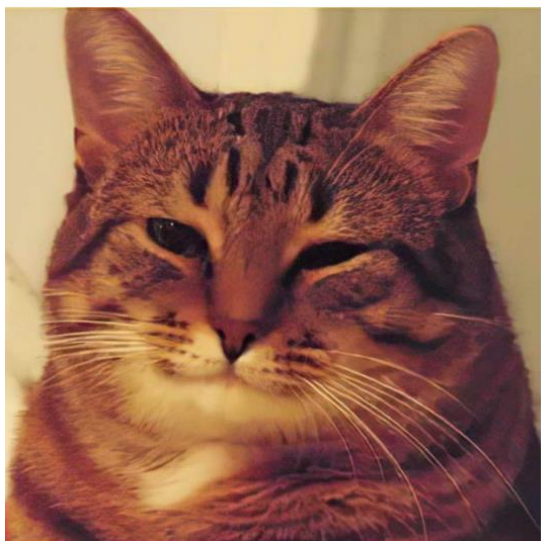
За счет своих свойств ГНС могут найти широкое применение в различных отраслях (от композитов до сорбентов и медицины), но до сих пор не используются на практике.



Идеальный графен



реальный графен



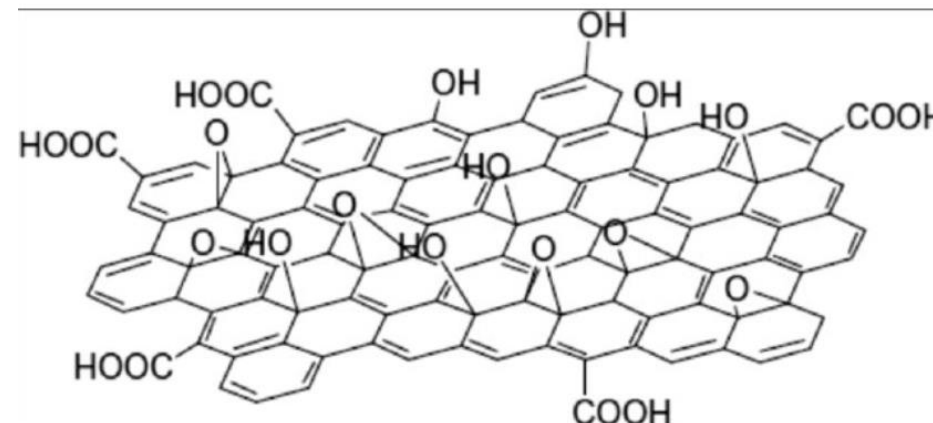
Реальные ГНС



Количество слоев:

- 1) Электронная микроскопия высокого разрешения
- 2) Атомно-силовая микроскопия
- 3) Спектроскопия комбинационного рассеяния
- 4) Рентгеновская дифракция

Метод	Описание
СЭМ/ПЭМ высокого разрешения	<div>-Сложная пробоподготовка</div> <div>-отдельные частицы</div> <div>+наглядность, точность</div>
АСМ	<div>-Сложная пробоподготовка</div> <div>-отдельные частицы</div> <div>+наглядность, точность</div>
СКР (Раман)	<div>-пригодно только для малодефектных ГНС (пленки)</div> <div>-отдельные частицы</div> <div>+простая пробоподготовка</div>
Рентгеновская дифракция	<div>-погрешность до ± 2 слоев.</div> <div>+простая пробоподготовка</div> <div>+весь объем пробы</div> <div>+универсальность</div>



Линейные размеры: СЭМ/ПЭМ или DLS

Элементный состав: EDX или рентгенофазовый анализ

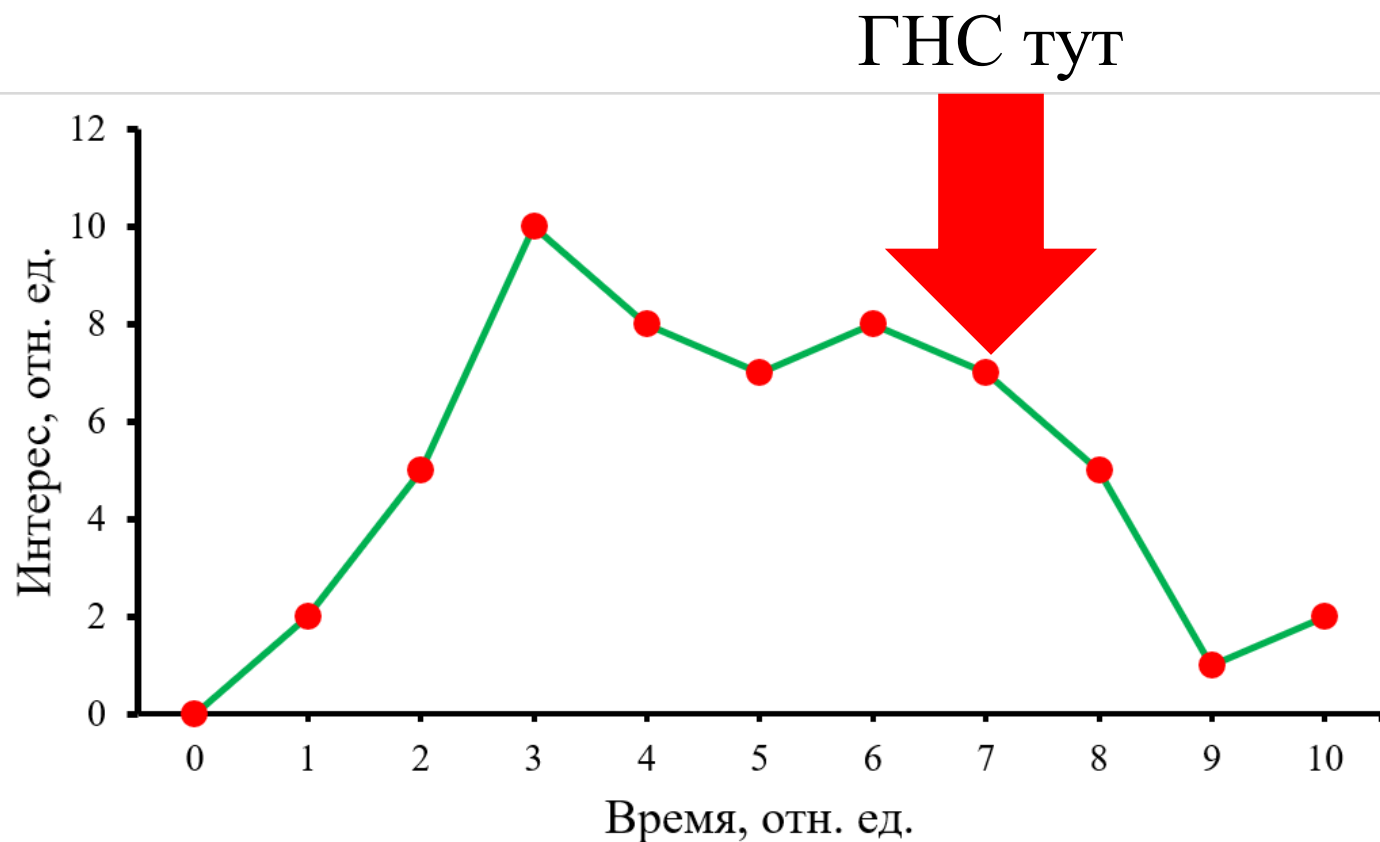
Состав поверхностных групп: ИК-Фурье спектрометрия или РФЭС (XPS)

Дефектность: СКР (Раман)

Удельная поверхность и пористость: низкотемпературная сорбция азота+БЭТ



Динамика развития ГНС



0-материал не известен

1-первая публикация

2-открыты интересные свойства

3-массовое тестирование,
первые успехи

4-Несовпадение теории с практикой

5-установление причин
несовпадения

6-попытка быстрого решения
проблем

7-отсутствие быстрого успеха

8-инерционные исследования

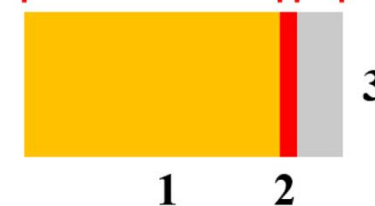
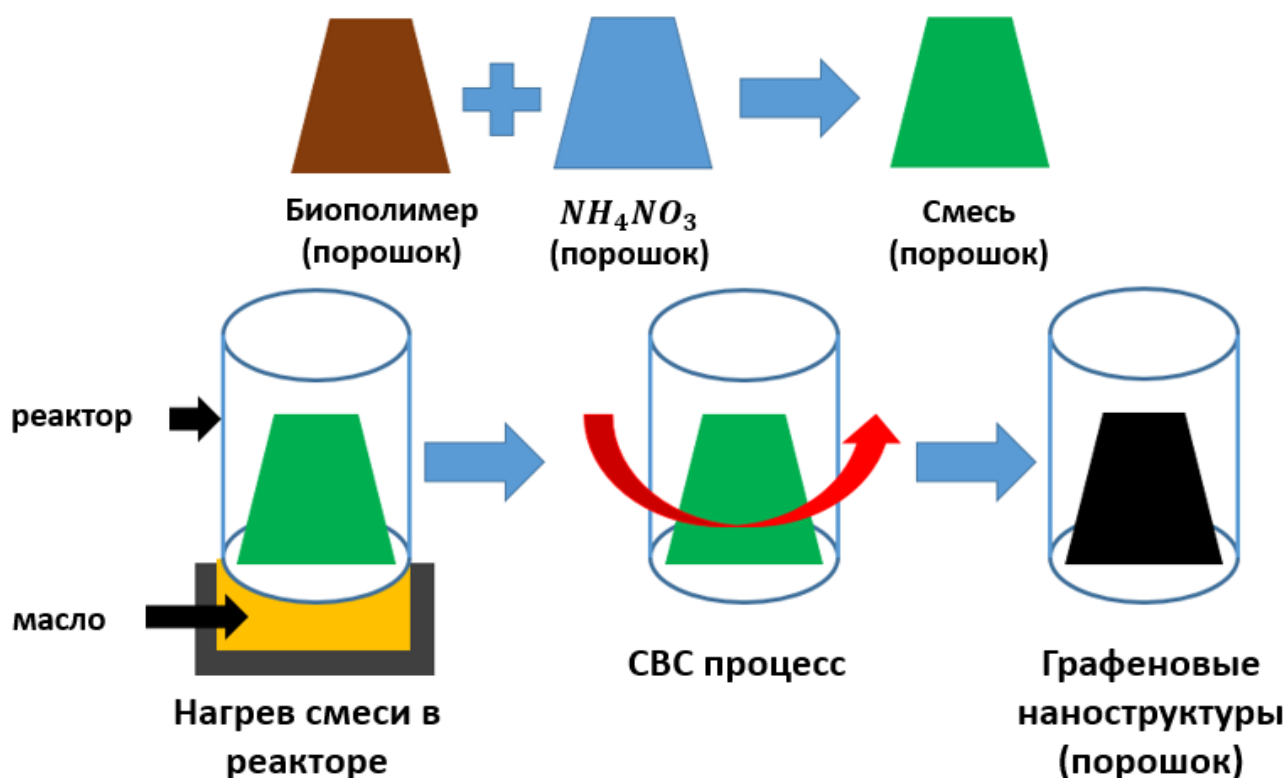
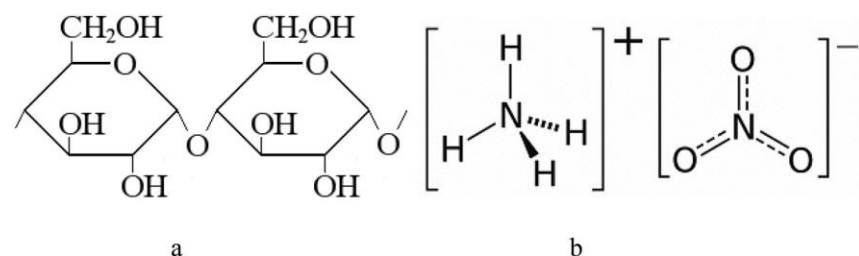
9-интерес последних энтузиастов

10-о, новый супер-материал!

- 1) При исследованиях необходимо работать с качественно охарактеризованными ГНС и учитывать их структуру.
- 2) Учитывать факторы реального эксперимента: дефектность частиц, их агрегацию и т.д.
- 3) Нужны новые методики синтеза ГНС, позволяющие синтезировать много, дешево и с высоким качеством.



Синтез МГ в условиях СВС с использованием биополимеров





25.09.2025

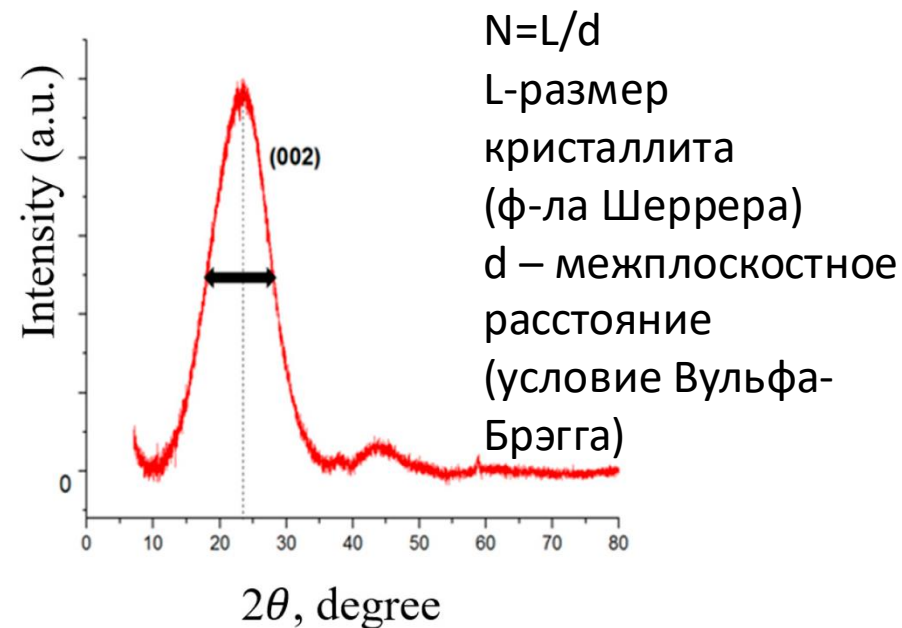
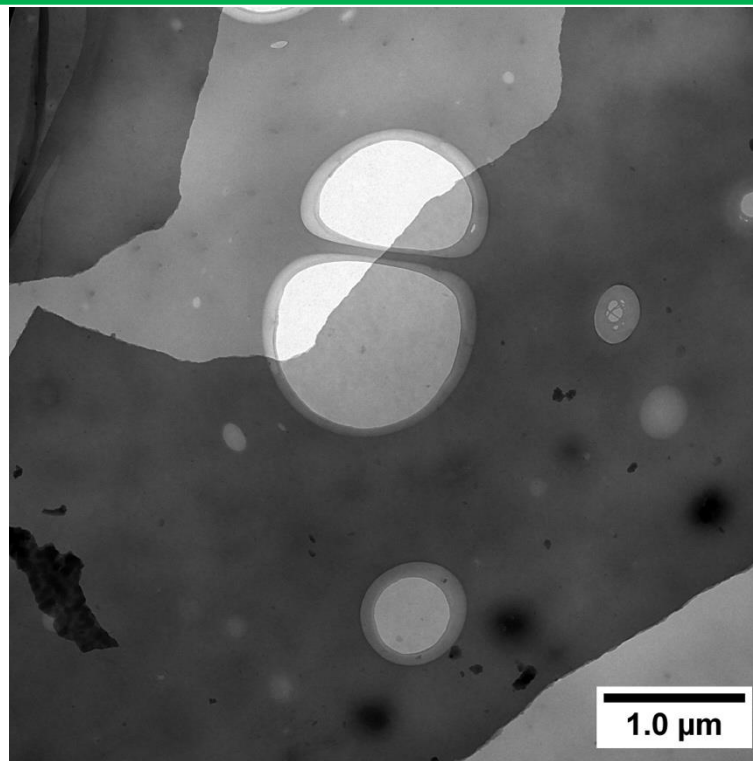
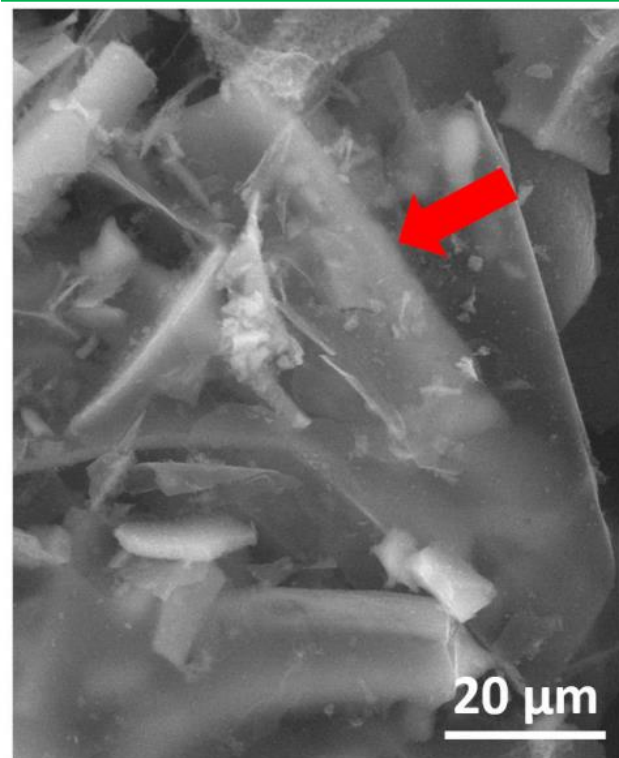
13:45-14:00

Возняковский Александр Петрович

О механизме получения sp^2 графеновых структур при карбонизации
лигнинов в условиях самораспространяющегося
высокотемпературного синтеза с использованием биополимеров

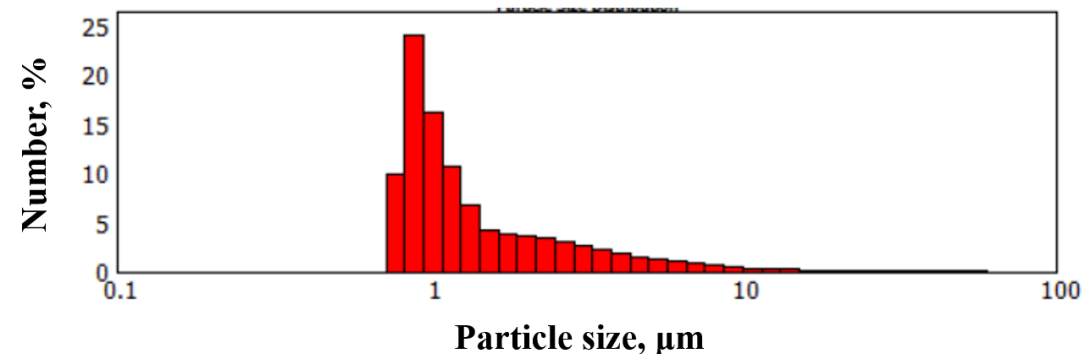


Характеризация МГ полученного в условиях СВС



Количество слоев < 5

Sample of FLG	Specific Surface, m ² /g	True Density, g/cm ³
From cellulose	672	2.13
From glucose	512	2.11
From Lignin	500	2.12

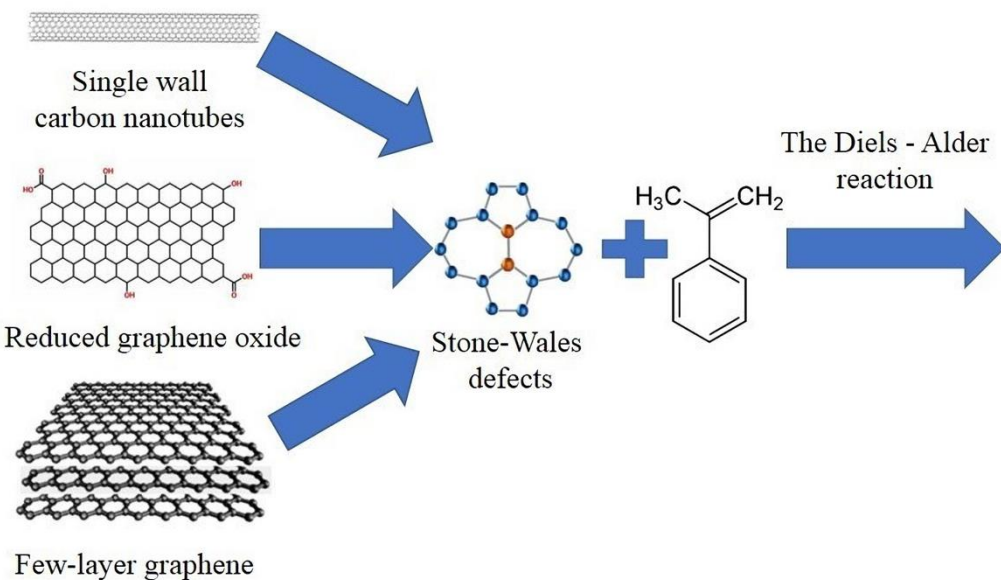


Voznyakovskii A, Vozniakovskii A, Kidalov S. New Way of Synthesis of Few-Layer Graphene Nanosheets by the Self Propagating High-Temperature Synthesis Method from Biopolymers. *Nanomaterials*. 2022; 12(4):657. <https://doi.org/10.3390/nano12040657>

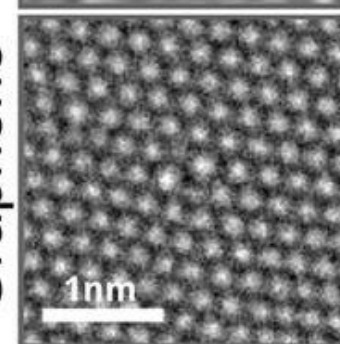
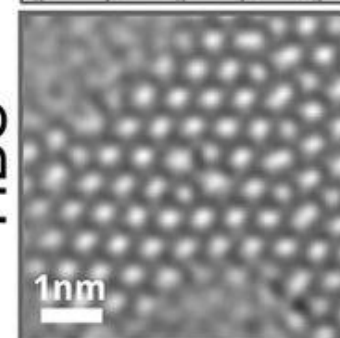
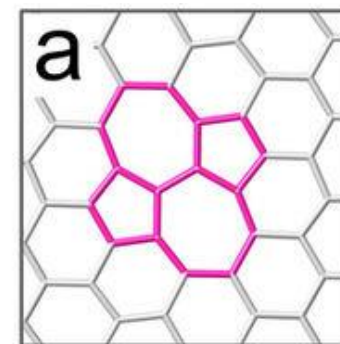
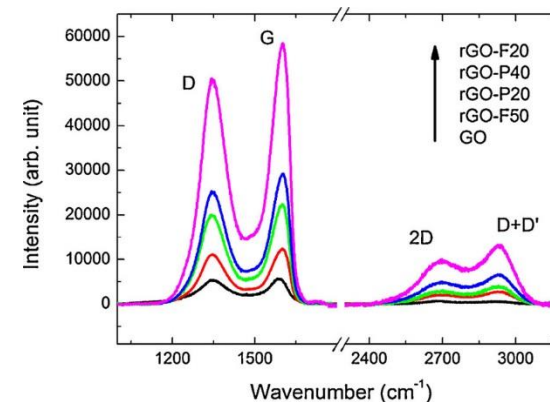


Химическая методика определения дефектов Стоуна-Уэйлса (Stone & Wales) в 1D и 2D наноматериалах

Разработана химическая методика **количественного** высокоточного детектирования дефектов Стоуна — Уэйлса по всему объему пробы.



Sample	Stone-Wales Defect Concentration, mol/m ²
single wall carbon nanotubes	1.1×10^{-5}
reduced graphene oxide	3.6×10^{-5}
Few-layer graphene	0



Реакция диенового синтеза (реакция Дильса-Альдера)
Убыль α-метилстирола
Неизменность концентрации о-ксилола (стандарт)
Контроль с помощью хроматографа

Sample	Stone–Wales Defects Concentration C_{SW} (mol/m ²)	I_d/I_g	Specific Surface m ² /g
SWCNT	1.1×10^{-5}	0.028	300
rGO	3.6×10^{-5}	0.76	580
FLG	0	1.2	660

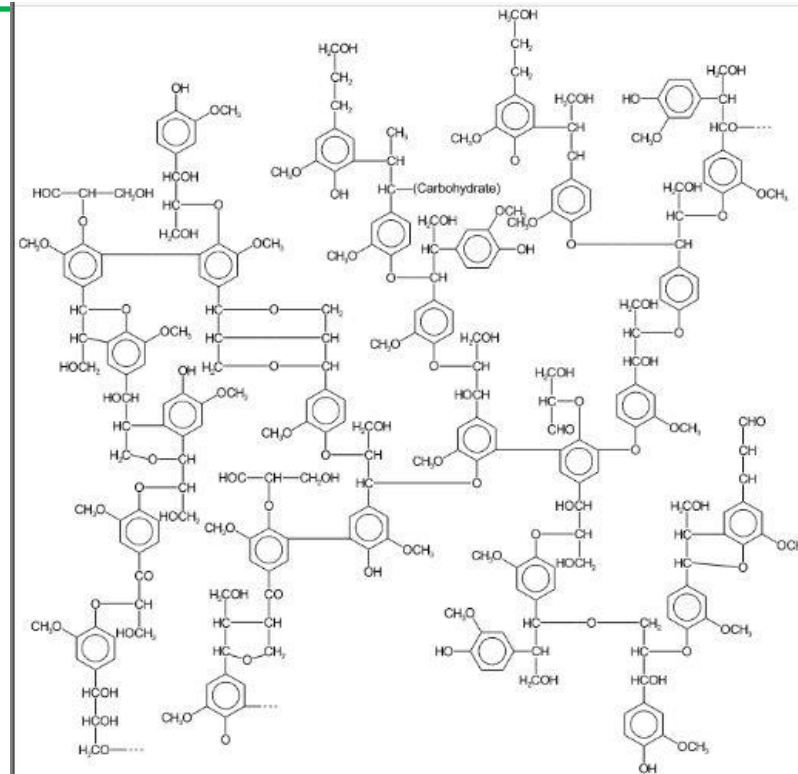


Переработка отходов-биополимеров

Лигнин – отход деревообрабатывающей промышленности

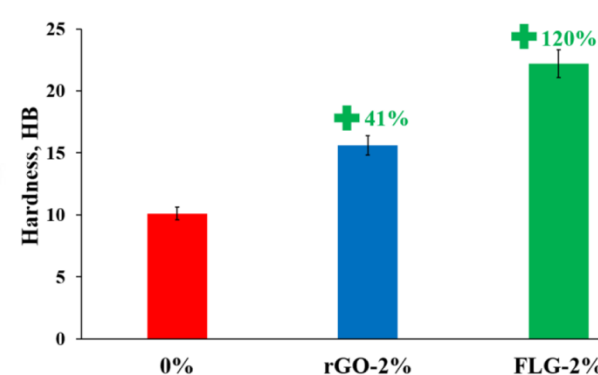
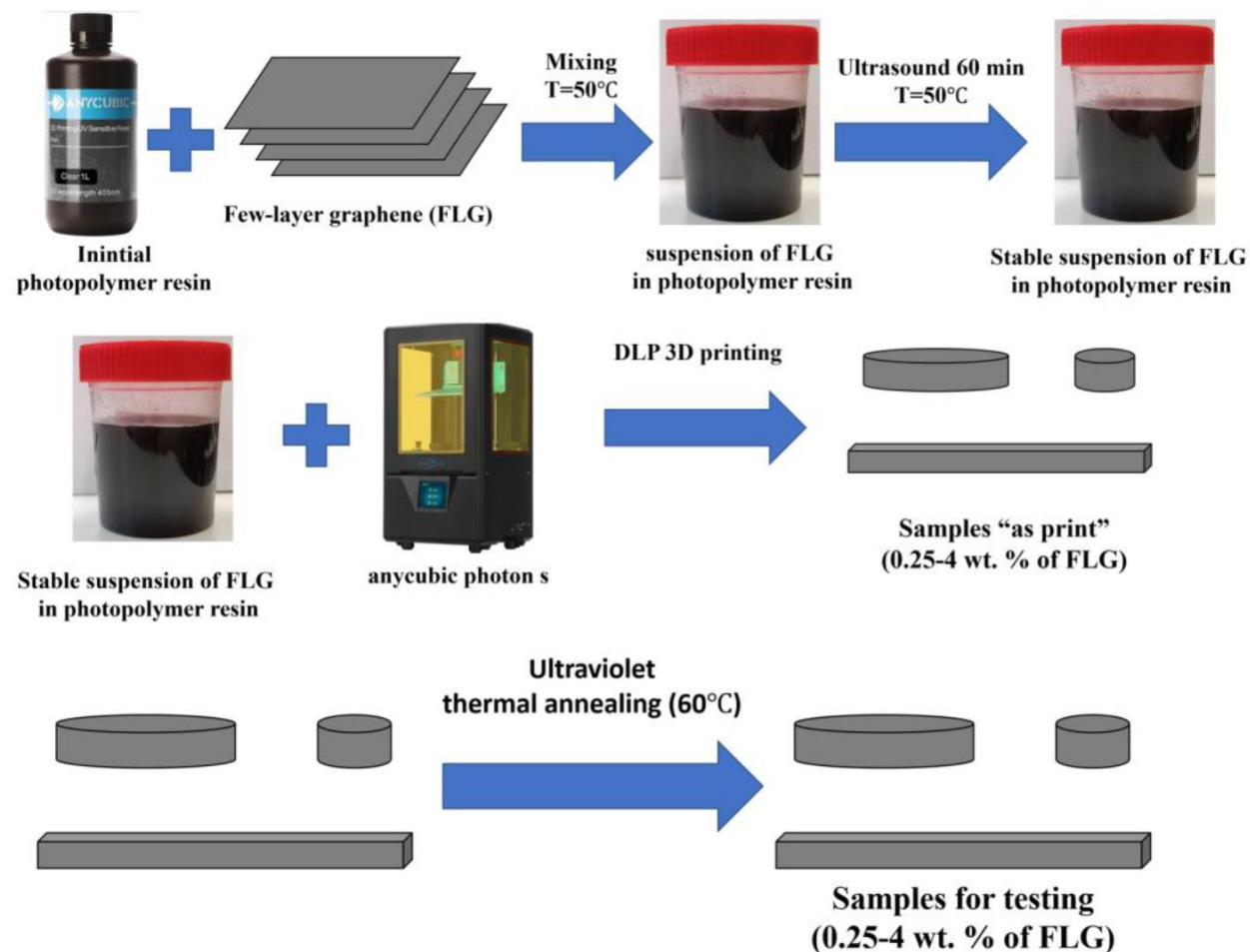
Проблемы:

- 1) В мире **УЖЕ** накоплено более **100 млн. т.** технического лигнина в виде отходов!
- 2) **Ежегодно** в мире образуется **около 70 млн. т.** технических лигнинов. Из них перерабатывается **не более 2%**.
- 3) Самовозгорание могильников лигнина
- 4) Появление т.н. “биотоплива” (Этанол) только усугубляет ситуацию!
- 5) Кора – аналогичная ситуация:
50-60% - в отвал
20-30% - сжигается
10-15% - перерабатывается
- 6) грязная целлюлоза – картон, бумага с жиром, пятнами и т.д.
- 7) **Нефтяной кокс**

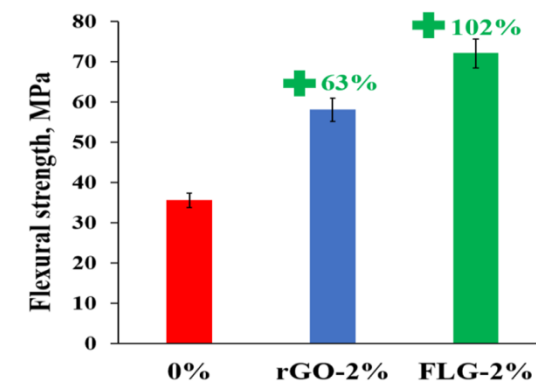




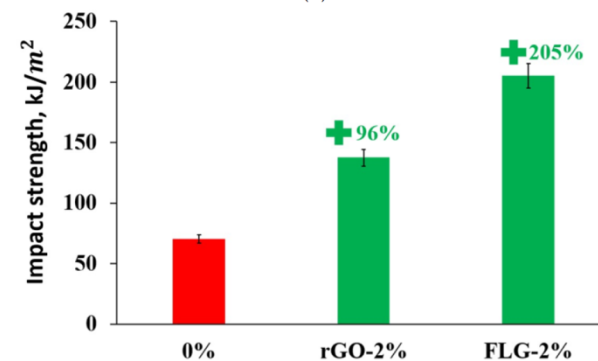
МГ в полимерных композитах полученных DLP методом 3D печати



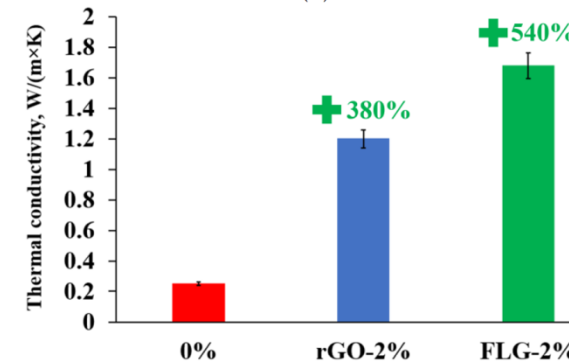
(a)



(b)



(c)



(d)

МГ не содержащий дефекты Стоуна — Уэйлса позволяет получать более высокие результаты, чем ГНС содержащие эти дефекты.

Kidalov, S.; Voznyakovskii, A.; Vozniakovskii, A.; Titova, S.; Auchynnika, Y. The Effect of Few-Layer Graphene on the Complex of Hardness, Strength, and Thermo Physical Properties of Polymer Composite Materials Produced by Digital Light Processing (DLP) 3D Printing. Materials 2023, 16, 1157.

<https://doi.org/10.3390/ma16031157>



25.09.2025

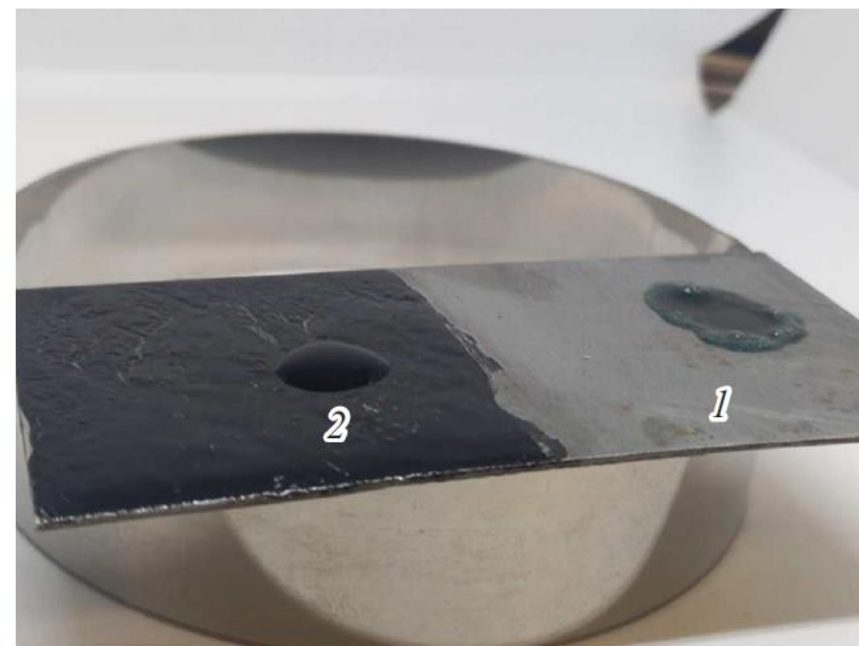
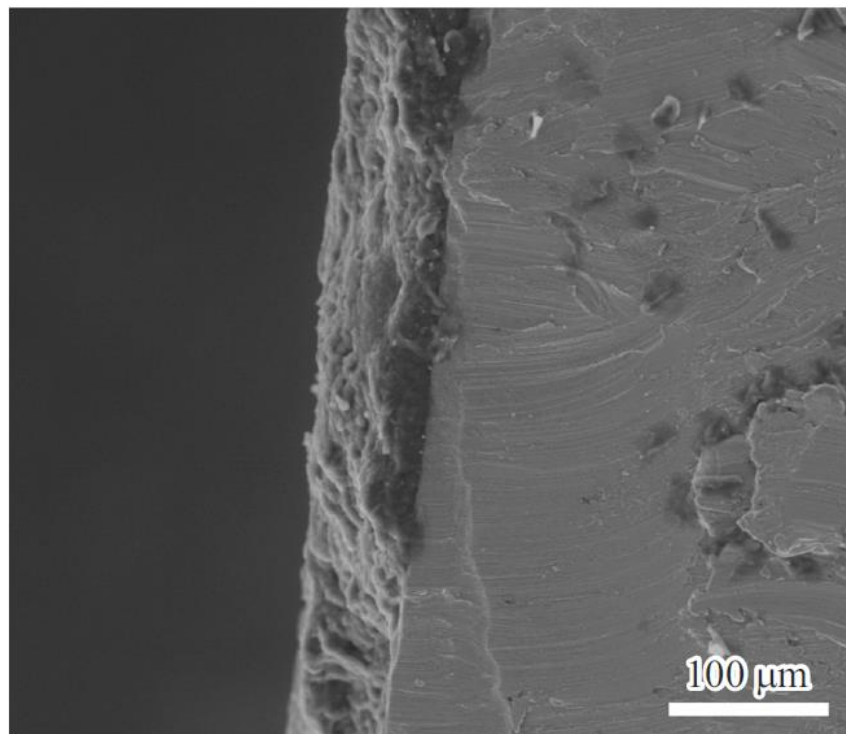
15.00 - 15.15

Калашникова Екатерина Игоревна

Теплофизические свойства наножидкостей на
основе воды, модифицированных
малослойным графеном



Защитные покрытия на основе МГ





Подложнюк Н.Д., Возняковский А.А., Кидалов С.В., Возняковский А.П.

Дистанционный доклад

Механические свойства эпоксидной смолы модифицированной
малослойным графеном, полученным методом СВС



МГ как сорбент радионуклидов

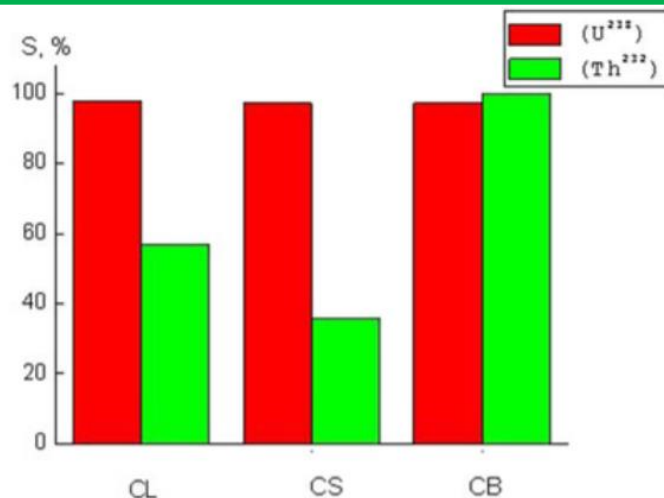


Figure 2. Adsorption rate S for samples CL, CS and CB in relation to radionuclides U^{238} and Th^{232} .

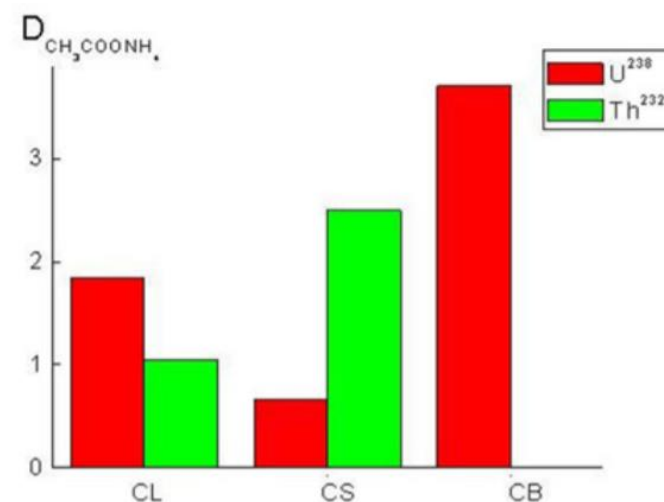
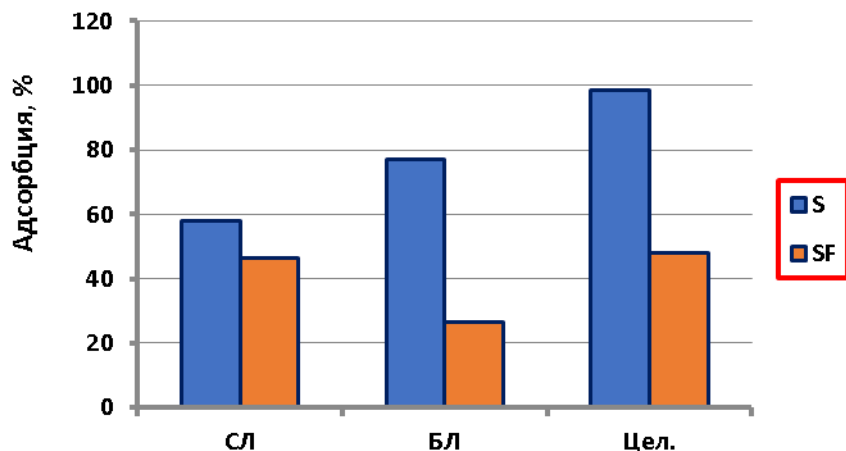


Figure 3. The degree of desorption D (%). (a) D_{H_2O} , (b) $D_{CH_3COONH_4}$ of samples CL, CS and CB in relation to radionuclides U^{238} and Th^{232} .

Сорбция до 100%.

Практически отсутствует десорбция

Применение: Создание эффективных сорбентов для очистки воды от радионуклидов.

Сорбция в отношении радия-226

Vozniakovskii A.P., Kidalov S.V., Vozniakovskii A.A., Karmanov A.P., Kocheva L., Rachkova N. Carbon nanomaterials based on plant biopolymers as radionuclides sorbent. Fullerenes, Nanotubes, Carbon Nanostruct. 2020. 28(3). 238-241. DOI:10.1080/1536383X.2019.1686627

A. A. Vozniakovskii, A. P. Voznyakovskii, S. V. Kidalov, A. P. Karmanov, N. G. Rachkova, N. D. Podlozhnyuk, Sorption of Radium-226 on Few-Layer Graphene Synthesized under Conditions of Self-Propagating High-Temperature Synthesis, Colloid Journal, 2024, 86 (2), 178-184. DOI:10.1134/S1061933X23601348



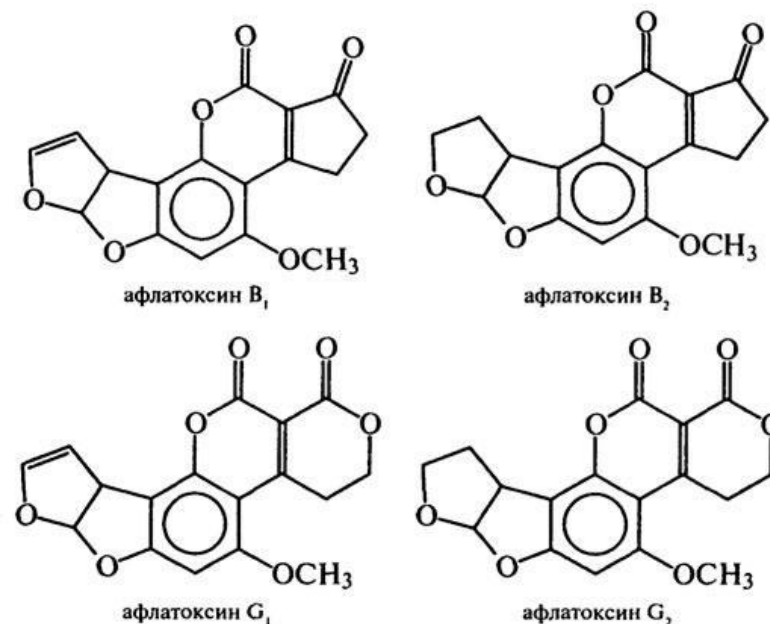
МГ как сорбент микотоксинов

Микотоксины — токсины, низкомолекулярные вторичные метаболиты, продуцируемые микроскопическими плесневыми грибами.



Таблица 2. Сорбционно-десорбционные характеристики образцов FLG в отношении микотоксина Т-2, %

Образец	Q	D_s	Q_s
FLG_г	96.0 ± 0.8	0.17 ± 0.02	95.3 ± 0.9
FLG_сел	> 99.0	< 0.1	> 99.0
FLG_б	96.4 ± 0.6	< 0.1	96.4 ± 0.6



Для основных микотоксинов в ряде стран установлены ПДК. В пищевых продуктах ПДК афлатоксина В1 0,005, патулина 0,05, токсина Т-2 0,1, дезоксиниваленола 0,5 и 1,0 (в зависимости от вида продукта), зеараленона 1,0 мг/кг.



Выводы

- 1) СВС метод позволяет получать большие объемы малослойного графена (до 10 кг/мес.) в т.ч. из отходов деревообрабатывающей промышленности (кора, лигнин, борщевик).
- 2) Разработана химическая методика количественного детектирования дефектов Стоуна-Уэльса с чувствительностью $0,1 \times 10^{-5}$ моль/г.
- 3) Установлено, что синтезированный малослойный графен не содержит в своей структуре дефектов Стоуна-Уэльса .
- 4) Показана высокая эффективность малослойного графена при создании полимерных композитов на основе различных матриц.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов БРФФИ № T23РНФМ и РНФ 24-49-10014.

Спасибо за внимание!
Приглашаем к сотрудничеству!

КОНТАКТЫ:

alexey_inform@mail.ru
+79052203509



Публикации

**[https://www.researchgate.net/
profile/Aleksei-Vozniakovskii](https://www.researchgate.net/profile/Aleksei-Vozniakovskii)**

