

**А. Г. Бочкова,**  
**A. D. Bochkova,**  
*bochkova-n@ro.ru,*  
**Н. Ю. Стожко**  
**N.Y u. Stozhko**  
*sny@usue.ru*

ФГБОУ ВО «Уральский государственный  
экономический университет», г. Екатеринбург  
Ural State University of Economics, Ekaterinburg

## **ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ ПРИМЕНЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ** **ENVIRONMENTAL RISKS OF USING CARBON NANOMATERIALS**

**Аннотация:** В статье рассмотрены свойства и применения углеродных наноматериалов, таких как фуллерены, нанотрубки и графен. Особое внимание уделено актуальным вопросам токсикологического влияния этих наноматериалов на живые организмы.

**Abstract:** The properties and applications of carbon nanomaterials such as fullerenes, nanotubes and graphene are discussed in the article. Particular attention is paid to topical issues of the toxicological effect of these nanomaterials on living organisms.

**Ключевые слова:** углерод, наночастицы, УНТ, фуллерен, графен, токсикология.

**Keywords:** carbon, nanoparticles, CNT, fullerene, graphene, toxicology.

Углерод является основой жизни. Данный элемент является универсальным благодаря его способности образовывать устойчивые связи с другими элементами, в том числе и с самим собой. Элемент под номером шесть в Периодической таблице химических элементов является органогеном. Он лежит в основе всех биополимеров и играет важную роль в функционировании биосистем. Ни один другой химический элемент не обладает тем разнообразием свойств, порой явно противоположных, которые свойственны углероду. Неповторимые качества этого элемента и его аллотропных модификаций служат предметом фундаментальных исследований и обуславливают широкое его применение в разнообразных областях науки и технологий.

Еще несколько десятилетий назад были известны три основные аллотропные формы углерода: алмаз, графит и карбин. Но в последнее время были обнаружены новые модификации углерода с неповторимыми свойствами – фуллерены, углеродные нанотрубки и

графен (рис. 1). За сравнительно короткое время, прошедшее с момента открытия фуллеренов в 1985 г., углеродных нанотрубок в 1991 г. и графена в 2004 г., уникальные свойства наноматериалов на основе углерода вызвали большой интерес, что способствовало разработке методов масштабного промышленного производства.

Постоянно растущее коммерческое использование инженерных углеродных наноматериалов включает в себя технические, медицинские, экологические и сельскохозяйственные применения (табл. 1). Независимо от области применения и роста тенденций в использовании, происходят значительные выбросы углеродных наноматериалов в окружающую среду, где воздействие на живые организмы все еще трудно предсказать.

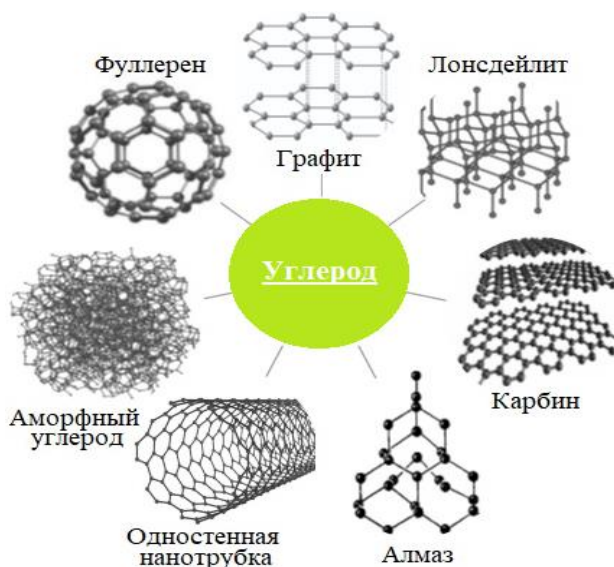


Рис. 1. Кристаллические структуры аллотропных модификаций углерода

О необходимости проведения токсикологических исследований наноматериалов и оценки рисков говорится в Постановлении № 79 от 31 октября 2007 г. "Об утверждении Концепции токсикологических исследований, методологии оценки риска, методов идентификации и количественного определения наноматериалов".

Таблица 1. Сферы применения углеродных наноматериалов

Углеродный наноматериал	Свойства	Применение
Графен	Представляет собой «развернутую углеродную нанотрубку. Обладает хорошей электропроводностью, высокой прочностью и гибкостью. Графену характерна полная оптическая прозрачность, а также высокая энергоёмкость, в 47 раз превышающая литий-ионные аккумуляторы.	Нанoeлектроника; Процессоры IBM и Intel; новые композитные материалы.
Нанотрубки	Разнообразие форм. Большая	FED- и OLED- дисплеи;

	прочность при растяжении и изгибе. Высокая электропроводность и устойчивость к изнашиваемости. Обладают адсорбционными свойствами, гидрофобностью, а также высокой огнестойкостью.	энергонезависимая память и чипы NRAM; процессоры IBM и Intel; композитные материалы; солнечные батареи и аккумуляторы; емкости для хранения водорода; системы очистки воды.
Фуллерен	Высокая сорбционная способность. В неагломерированном состоянии способен к проникновению через тканевые барьеры. Является сверхпроводником.	Композитные материалы; пластмассы; косметика.

Углеродные нанотрубки (УНТ) представляют собой полые цилиндрические структуры диаметром от десятых до нескольких десятков нанометров и длиной от одного микрометра до нескольких сантиметров, состоящие из одной или нескольких плоскостей. Данные, опубликованные К. Дональдсоном (K. Donaldson) и соавторами в 2006 г. [1, с. 10], доказывают, что попадание в организм углеродных нанотрубок при вдыхании несет вред для здоровья, сопоставимый с вредом, наносимым организму асбестом. УНТ могут вызывать фиброз лёгких, рак, изменения плевры и мезотелиомы по аналогии с минеральными и синтетическими стекловидными волокнами. Воздействие нанотрубок массой от 10 до 80 мкг на мышей через дыхательные пути показало повреждение сосудов, а также нарушение микроциркуляции в сердечной ткани через сутки после однократного введения [5, с. 771]. В зависимости от способа синтеза углеродные нанотрубки могут содержать ряд тяжелых металлов (Co, Fe, Ni и Mo и др.), которые могут рассматриваться как загрязняющие вещества, обладающие токсическими эффектами.

Фуллерены относятся к числу наиболее изученных наноматериалов, однако широкого распространения на рынке они не получили. Основные производственные мощности по синтезу фуллеренов сосредоточены в США (30%) и Японии (48%). В 2017 г. в Пензенской области компания РосАтом открыла первое в России производство фуллеренов. В настоящее время японская компания производит фуллеренсодержащую косметику. Наночастицы фуллерена обладают отличными сорбционными свойствами, поэтому они были добавлены в дорогую линию омолаживающих косметических средств, приводящих к непосредственному контакту наноматериала с кожей. Дальнейшие возможные применения пока не реализованы на практике. Несмотря на малую ориентированность их в производстве, с фуллеренами связывают идею о хранении ядовитых радиоактивных материалов. Обсуждается также идея создания противораковых препаратов – самоуничтожающихся фуллеренов, заполненных радиоактивными изотопами [6].

Графен, открытый недавно российскими учеными А. Геймом и К. Новоселовым, произвел фурор в научном мире. Особенностью графена являются прочность, большая теплопроводность, наличие легких носителей заряда с наибольшей длиной свободного пробега, материал является самым тонким. Графен может выдерживать ток огромной плотности и механические растяжения, является уникальной непроницаемой мембраной, не пропускающей даже атомы гелия. С помощью графена специалисты провели секвенирование ДНК. В комбинации с лазером графен может оказывать антиканцерогенное действие. Практическое применение графена ограничено отсутствием крупномасштабного производства. Тем не менее исследователи взялись за изучение токсичности данного материала. Так, О. Алексеева проследила изменение фермента лактатдегидрогеназы, показателя некроза и апоптоза клеток под действием графена и выявила, что при концентрациях примерно 1 мкг/мл токсичность графена несколько выше, чем у одностенной углеродной нанотрубки [3]. Механизм токсичного воздействия графена, как считает автор, связан с окислительным стрессом, при котором наблюдается генерация активных форм кислорода. Для того, чтобы дать точную оценку токсикологическому эффекту от использования графена, данных, по-прежнему, слишком мало.

Исследования Л. В. Власенко позволили выявить антибактериальную активность (токсичность) у углеродных наноматериалов, используя lux-биосенсоры на основе ферментативного процесса люминесцентных микроорганизмов, сопровождающегося потреблением кислорода и выделением света [4]. Было зафиксировано наличие токсического эффекта у 4 из 10 тестируемых УНМ 1-ой группы штамма *Protobacterium phosphoreum*. Наибольшую биоактивность в данном тесте проявляли фуллеренол (водорастворимое производное легкого C70-фуллерепа) и оксид графена. Менее выраженный, но сходный по скорости и интенсивности токсический эффект детектирован у нановолокон с кислотной функционализацией у одностенных УНТ, содержащих на своей поверхности 2-5 % COOH-групп. Одностенные углеродные нанотрубки, содержащие на своей поверхности 2-5 % NH<sub>2</sub>-групп, многостенные УНТ, нановолокна, графен, C60- и C70-фуллерены в исследуемом диапазоне концентраций не оказывали влияния на интенсивность свечения lux-биосенсора и в этой связи были оценены как биологически инертные.

В ряде исследований, посвященных изучению различных видов наноматериалов, было выявлено, что токсикологический эффект связан с величиной дозы по массе тела, а также зависит от их физических и химических свойств. В некоторых исследованиях число наночастиц было наилучшим показателем дозы воздействия, в то же время, как в других исследованиях, степень токсичности была связана с количеством функциональных групп на поверхности наночастиц.

Углеродные наночастицы могут взаимодействовать с водными системами через канализационные стоки или косвенно, поступая из почвы во время захоронения твердого наноматериала (или продуктов, содержащих этот наноматериал) на свалках. Способность общественных систем очистки воды к удалению этих частиц из притока не исследована. Специфические свойства, такие как поверхностный заряд и наличие поверхностно-активных веществ, являются одними из трудностей, связанных с удалением наноматериалов [2].

Таким образом, открытые сравнительно недавно новые структурные формы углерода открывают широкие перспективы создания современных материалов, аппаратов и технологий, которые существенно повысят качество нашей жизни, а своевременный надзор и токсикологический контроль обеспечат экологическую безопасность производства углеродных наноматериалов. И как сказал Е. Кац в своей статье: «Углерод – основа жизни и вполне вероятно, что «углеродные шарики», «трубочки», "полосочки" и "колечки", обладая невероятными свойствами, помогут людям в борьбе с болезнями и другими проблемами и жизнь на Земле станет более безопасной, комфортной и радостной. И предсказание Ф. М. Достоевского: «красота спасет мир» станет реальностью» [6].

#### Список литературы

1. Carbon Nanotubes: A Review of Their Properties in Relation to Pulmonary Toxicology and Workplace Safety / K. Donaldson, R. J. Aitken, L. Tran, V. Stone. – Text : electronic // Toxicological Sciences. – 2006. – Vol. 92, is. 1. – P. 5–22. – URL: <https://academic.oup.com/toxsci/article/92/1/5/1642931>.

2. Risk Assessment and Health, Safety, and Environmental Management of Carbon Nanomaterials / Lenze Silva G., Viana C., Domingues D., Vieira F. – URL: <https://www.intechopen.com/books/nanomaterials-toxicity-human-health-and-environment/risk-assessment-and-health-safety-and-environmental-management-of-carbon-nanomaterials#B65>. – Text : electronic.

3. *Алексеева, О.* Цитотоксичность графена и нанотрубок – форма важнее содержания / О. Алексеева. – Текст : электронный // ПерсТ. – URL: [http://perst.issp.ras.ru/Control/Inform/perst/2011/11\\_05/n.php?file=perst.htm&label=E\\_11\\_05\\_5](http://perst.issp.ras.ru/Control/Inform/perst/2011/11_05/n.php?file=perst.htm&label=E_11_05_5).

4. *Власенко, Л. В.* Оценка антибактериальной активности углеродных наноматериалов с использованием бактериальных люминесцирующих биосенсоров : специальность 03.02.03 «Микробиология» : диссертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук / Власенко Людмила Викторовна ; ФГБНУ «ФНИЦ биологических систем и агротехнологий» РАН. – Пермь, 2020. – 132 с. – Текст : непосредственный.

5. Токсичность углеродных нанотрубок: специальные и отдалённые эффекты воздействия, сценарии экспозиции, оценка риска / И. В. Гмошинский, В. А. Шипелин, С. А.

Хотимченко, Д. Б. Никитюк. – Текст : непосредственный // Гигиена и санитария. – 2017. – Т. 96, № 8. – С. 770–779.

6. Выставка «Наномир углерода». – Текст : электронный // Государственная публичная научно-техническая библиотека России : [сайт]. – URL: <https://www.gpntb.ru/vystavki-v-gpntb-rossii/113-chitateliam/6/6368-vystavka-nanomir-ugleroda.html>.