

## РАЗВИТИЕ РЫНКА НОВЫХ УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

**Д.В. Беликов**, нач. отд. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, канд. техн. наук, [belikovdi@extech.ru](mailto:belikovdi@extech.ru)  
**И.И. Бобринецкий**, вед. науч. сотр. НИУ МИЭТ, д-р техн. наук, [netadm@miee.ru](mailto:netadm@miee.ru)

*В статье приведены результаты анализа рынка углеродных наноматериалов, достигнутые результаты и направления их возможных применений. Показана динамика публикационной активности некоторых направлений разработки устройств с применением углеродных нанотрубок.*

**Ключевые слова:** углеродные наноструктурированные материалы, углеродные нанотрубки, композиционные материалы, алмазоподобные покрытия, органическая электроника, мемристор, динамика рынка, публикационная активность.

## MARKET DEVELOPMENT OF NEW CARBON NANOMATERIALS

**D.V. Belikov**, Head of Department, SRI FRCEC, Doctor of Engineering, [belikovdi@extech.ru](mailto:belikovdi@extech.ru)  
**I.I. Bobrinetsky**, Leading Researcher, NRU MIET, Ph. D. of Engineering, [netadm@miee.ru](mailto:netadm@miee.ru)

*The article presents the results of market analysis of carbon nanomaterials, the results achieved and their possible applications. It shows the dynamics of publication activity of some directions of development of devices using carbon nanotubes.*

**Keywords:** carbon nanostructured materials, carbon nanotubes, composite materials, diamond like coatings (diamond like carbon), organic electronics, memristor, market dynamics, publication activity.

Спрос на углеродные наноструктурированные материалы зависит от целого ряда различных факторов. В то время как экономика оказывает основное влияние на размер и рост рынка, существует ряд других факторов, которые могут рассматриваться как имеющие непосредственное влияние на спрос. Или, во всяком случае, природа этого спроса независит от промышленного производства и роста экономики.

Алмазоподобные покрытия (diamond like carbon) на основе та:С находят широкое применение в массовом производстве продукции, включая жесткие магнитные диски, автомобильные двигатели, уплотнения клапанов, режущие и формовочные инструменты, нефтегазовое оборудование. Интерес к данным материалам подтверждается динамикой публикационной активности в данной области, приведенной на рис. 1 (проведен на основе данных базы Scopus).

Функциональные покрытия на основе алмазоподобных наноструктур с существенными преимуществами могут быть использованы: в микроэлектронике — гидрофобные покрытия для смартфонов и самосмазывающие поверхности для магнитных жестких дисков, в оптике — просветляющие покрытия в широком оптическом диапазоне, в строительстве — фотокаталитические и «умные» покрытия, которые меняют свои свойства в зависимости от окружающей среды (например, изменения прозрачности стекол в зависимости от интенсивности излучения, изменения свойств покрытий от температуры).

В настоящее время существует необходимость замены покрытий из хрупкого и дорогого оксида индия-олова [1], используемого в устройствах отображения информации, солнечных батареях, сенсорных экранах, в качестве оптически прозрачных электродов для органических светоизлучающих диодов (OLED), в виде нагревательных элементов на стекле и полимерных пленках.

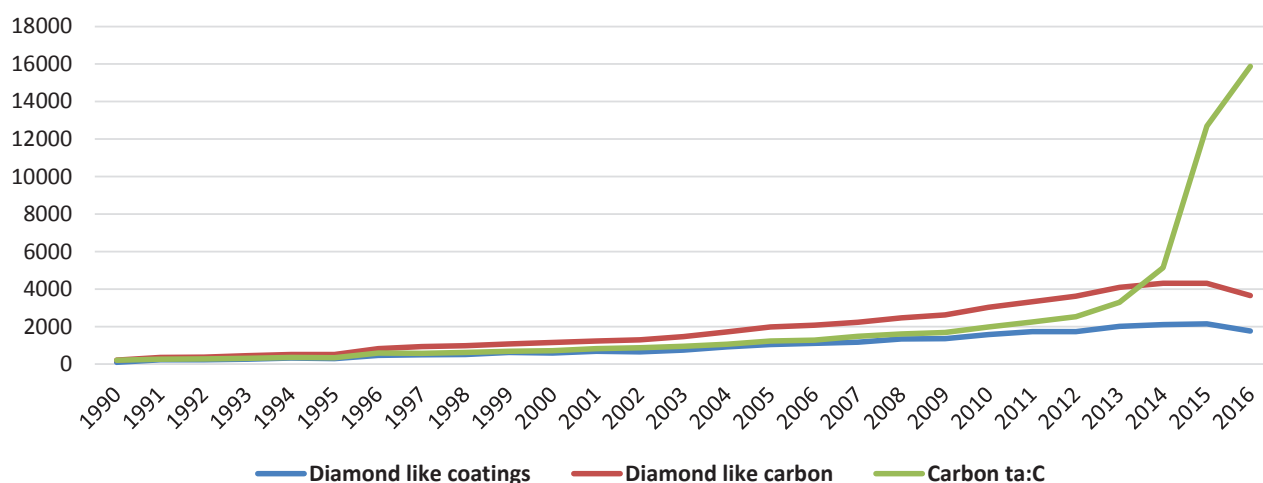


Рис. 1. Динамика публикационной активности в области алмазоподобных покрытий

В последней программе финансирования науки ЕС Горизонт 2020, принятой на период с 2014 по 2020 год, повышенное внимание уделено будущим и возникающим технологиям. Один из двух флагманских проектов «Графен» получил финансирование в размере одного миллиарда евро. Консорциум объединяет 23 страны (в основном из Европы) и 142 научно-исследовательских коллективов и промышленных партнеров [2].

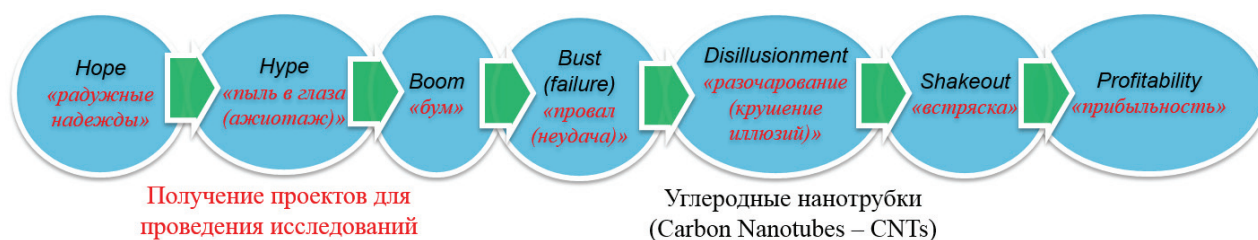


Рис. 2. Этапы развития новых технологий на примере углеродных нанотрубок

Считается, что любая новая технология проходит «Цикл зрелости технологий» [3]: «hope – hype – boom – bust (failure) – disillusionment – shakeout – profitability», т.е. «радужные надежды – пыль в глаза (ажиотаж) – бум – провал (неудача) – разочарование (крушение иллюзий) – встряска – прибыльность» (рис. 2).

На первых трех этапах научные коллективы получают проекты для проведения исследований, результатом которых является вал публикаций в научных журналах и выступлений на конференциях. Если исходить из этой схемы, то графен, углеродные нанотрубки (УНТ), фуллерены, материалы для высокотемпературной сверхпроводимости и многие другие открытия последних десятилетий прошли «пик завышенных ожиданий».

Хотя треть статей (доля от общего числа составляет 34%) о графене публикуется научными учреждениями и фирмами из Европы, главными держателями патентов (из приблизительно 14 000 патентов на июль 2014 г.) выступают фирмы и университеты Китая (40%), США (23%) и Южной Кореи (21%), а европейская доля составляет 9%. Среди фирм и университетов Самсунг является лидером по количеству патентов [4].

В конце 2010 г., мощности по производству УНТ (однослойных и многослойных) оценивались в 2500 т и, как ожидается, превысят в 2016 г. 12800 т [1] со среднегодовым темпом роста в размере 32,5% (рис. 3). В том же году, на Азиатско-Тихоокеанский регион приходилась наибольшая доля производства углеродных нанротрубок в 1122,6 тонн (44%), опередив Северную Америку – 740,1 т (29%) и Европу – 608,5 т (24%). По прогнозу в конце 2016 г. рынок углеродных нанротрубок будет оцениваться в 1,1 млрд долл. США.

Несмотря на наличие более ста производителей в сфере углеродных нанротрубок, наибольшая доля рынка сосредоточена у четырех относительно крупных компаний: Showa Denko К.К (Япония) – 20%, CNano Technology Limited (США) – 20%, Nanocyl S.A. (Бельгия) – 16%, Bayer MaterialScience AG (Германия) – 10% (на 2013 г. мощность промпроизводства – 3000 т/год). Пластики и композиты, топливопроводные системы, аккумуляторы и автоэмиссионные приборы являются наиболее популярным и коммерчески жизнеспособным текущим применением.

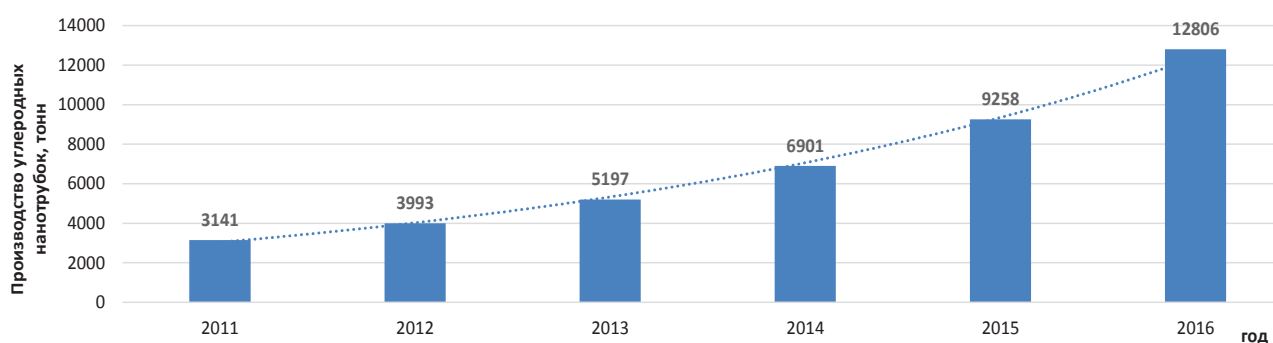


Рис. 3. Динамика мирового рынка углеродных нанротрубок с 2011 по 2016 гг.

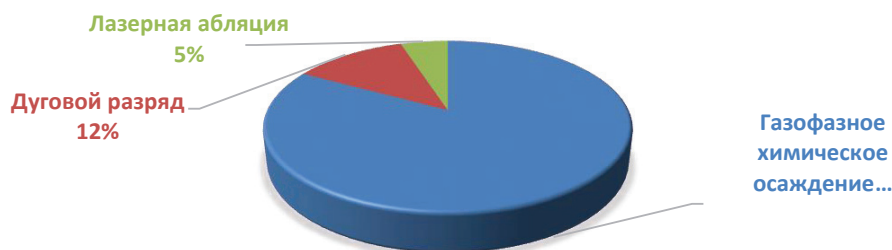


Рис. 4. Методы, используемые для синтеза углеродных нанротрубок

Наиболее широко используемыми методами для синтеза углеродных нанротрубок [1,5] являются: газофазное химическое осаждение (ГФХО) кристаллического наноуглерода на металлических катализаторах (Chemical Vapor Deposition – CVD-процесс и Catalytic Chemical Vapor Deposition – CCVD-процесс), дуговой разряд (испарение графита и последующая конденсация продукта при осаждении паров) и лазерная абляция. Благодаря сравнительно низкой энергоемкости и легкой масштабируемости процесса, высокой степени контроля, сравнительно «мягким» технологическим параметрам синтеза, применению дешевого и доступного углеродсодержащего сырья, простоте конструкций и технологичности изготовления используемой аппаратуры, отсутствию необходимости дорогой очистки от примесей, в 2010 г. методы ГФХО охватили около 83% мирового рынка производства УНТ (рис. 4).

Наибольшую долю глобального рынка углеродных нанотрубок занимают пластмассы и композиционные материалы с объемом продаж 472,9 млн долл. в 2010 г., представляющих 69% рынка (рис. 5). Существенным фактором, формирующим спрос на углеродные материалы, является их применение в качестве электропроводящих и термостойких компонентов (наполнителей) для пластмасс автомобильной отрасли и композитов для аэрокосмической и оборонной промышленности. Важным аспектом является соотношение углеродного материала в полимерных композитах, которое позволяет достичь необходимой электропроводности при небольших нагрузках.

Любые автомобильные детали, контактирующие с топливом, должны обладать электростатическими свойствами. Углепластики являются альтернативным материалом для автомобилестроения с точки зрения снятия электростатического заряда.

Говоря об объемах потребления углеродных материалов в производстве композитов различного назначения, видимо, речь идет не столько о УНТ и изолированных ультрадисперсных объектах, сколько о углеродных волокнах, имеющих микронную и субмикронную структуру. По прогнозу [1] пластмассы и композиты будут оставаться наиболее значимым рынком вплоть до 2017 г.

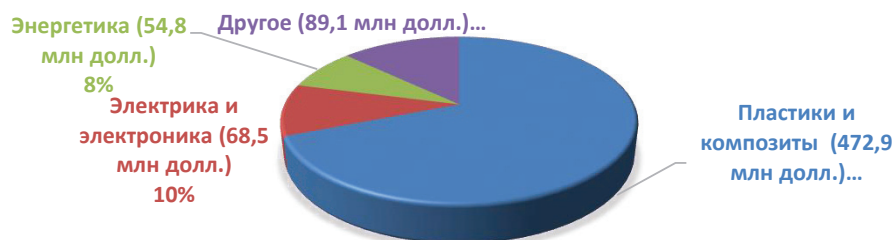


Рис. 5. Структура глобального рынка индустрии углеродных нанотрубок

На электротехническую и электронную отрасли промышленности приходится 10% рыночной доли углеродных нанотрубок (рис. 5). Предел традиционных вычислительных мощностей, связанный с ограничением механизма электронного транспорта в современных полупроводниковых материалах заставляет искать новые методы и пути развития электронной компонентной базы. Среди них известны, например, методы замещения традиционных материалов на углеродные (графен, нанотрубки, алмазы), а также методы, направленные на использование новых принципов функционирования, среди которых выделяются технологии на основе эффектов квантовой электроники, реализации нейроподобных сетей и систем с адаптивной логикой [6].

Исследователи полагают [7], что благодаря их достижениям в скором времени появится новый класс графеновой наноэлектроники с базовой толщиной транзисторов до 10 нм. Благодаря высокой подвижности (значительно большей, чем подвижность в кремнии, используемом в микроэлектронике)  $10^4 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  быстродействие такого транзистора будет заметно выше. Несмотря на то, что разработанное устройство уже способно работать как транзистор, оно обладает большим током утечки. Использовать напрямую графен при создании полевого транзистора без токов утечки не представляется возможным из-за отсутствия запрещенной зоны в этом материале, поскольку нельзя добиться существенной разности в сопротивлении при любых приложенных к затвору напряжениях, то есть не получается задать два состояния, пригодных для двоичной логики: проводящее и непроводящее. Затвор к нему еще не создан.

В электронику и системы хранения данных, скорее всего, рынок увидит крупнейшие проникновения к 2020 г. Улучшенные свойства углеродных нанотрубок позволят производителям электроники удовлетворить жесткие потребности рынка в различных разработках, включая межсоединения, дисплеи, память, устройства записи и хранения информации, технологии хранения энергии.

Библиометрический анализ публикационной активности в области органической электроники на основе данных базы Scopus и Google Scholar представлен на рисунках 6, 7. Данные разнятся (видимо, из-за учета патентов), но в целом динамика имеет общую тенденцию.

Согласно исследованиям ВШЭ [8], мировой рынок электроники на основе графена может достичь 1,5 млрд долл. в 2016–2020 гг., при среднегодовом темпе роста 46,8%.

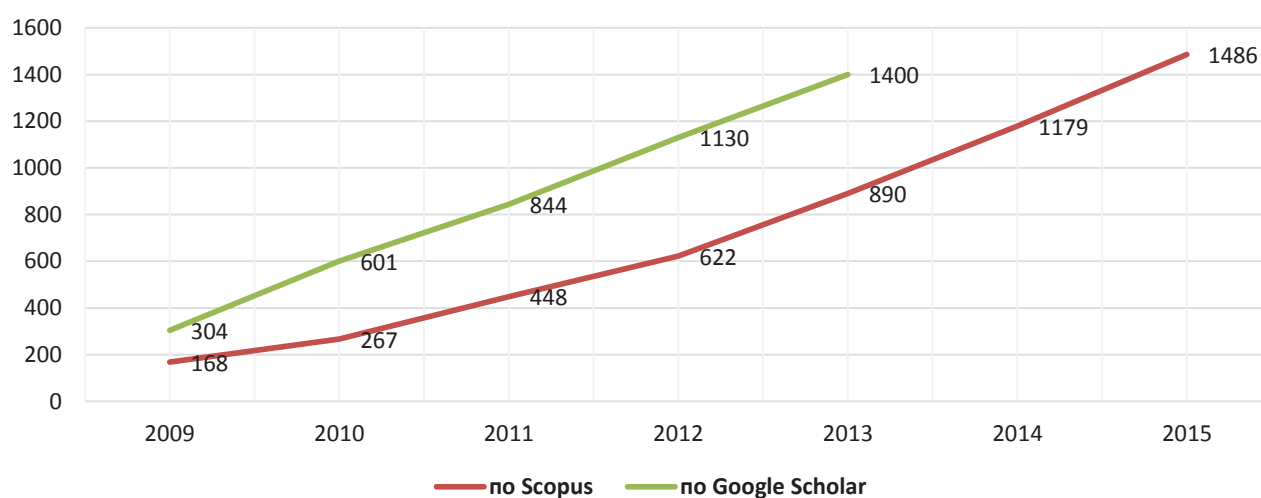


Рис. 7. Динамика публикационной активности в области мемристивной памяти (memristor)

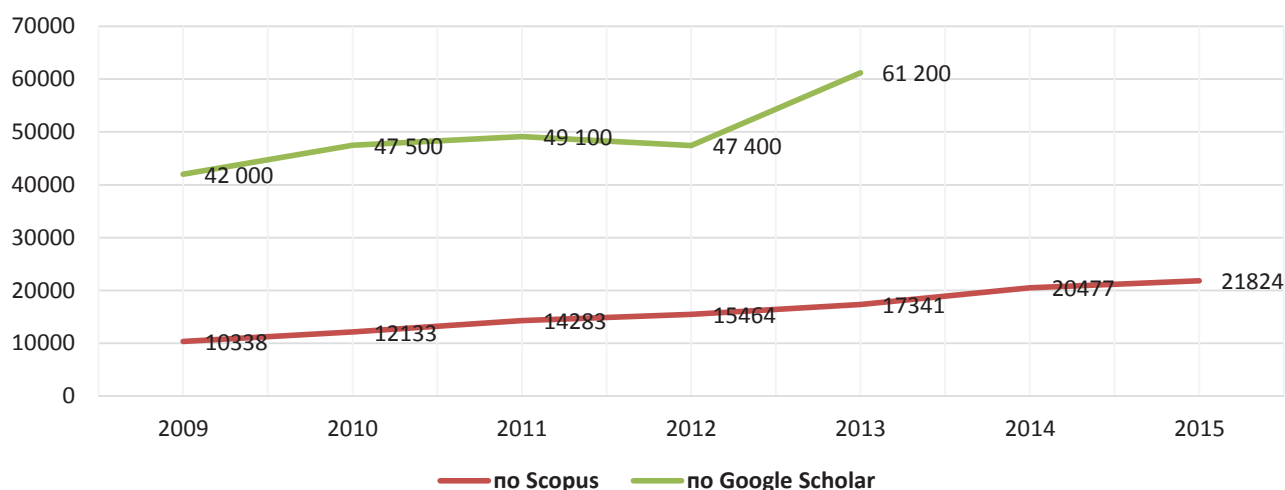


Рис. 6. Динамика публикационной активности в области органической электроники (organic electronics)

Одно из важных направлений применения углеродных материалов – интегрированные сенсорно-диагностические системы для контроля окружающей среды и состояния человека. Недавно осуществлен очередной прорыв в технологии: компания исследователей на базе инжиниринговой фирмы BOSH совместно с учеными из Института исследований твердого тела Макса-Планка, создали на основе графена магнитный датчик в 100 раз чувствительнее, чем эквивалентное устройство на основе кремния [2]. Области применения датчиков и сенсоров: от экологического мониторинга до промышленной безопасности.

С повышением производственных требований для аккумуляторов, лопастей ветрогенераторов, фотоэлектрических преобразователей (новые сенсibilизированные красителем солнечные батареи и наноструктурированные тонкие пленки) и других разработок [9] энергетический сектор также ожидает быстрый рост в ближайшие годы.

Повышенный спрос на большие лопасти ветряных турбин (более 60 м), увеличение мощности и качества побуждают производителей к использованию углеродных материалов. Вследствие нестационарной природы ветра большие лопасти подвергаются действию высоких механических напряжений в процессе эксплуатации. Снижение веса также является ключевым фактором. Углеродные волокна являются идеальным выбором из-за их высокой ударной прочности и малого веса, что позволяет выдерживать высокие механические нагрузки и максимально увеличить срок службы и эффективность.

Углеродные нанокompозиты начинают использовать как сверхъемкие электроды в двух и трехмерных структурах с большой площадью поверхности. Ожидается, что такие суперконденсаторы смогут хранить огромные объемы энергии.

Растущий спрос на передовую и сложную медицину и диагностическое оборудование также является важным фактором развития рынка углеродных материалов. Углеродные материалы обладают возможностью биологической совместимости, что позволяет использовать их уникальные проводящие свойства, например в нейроимплантах и биологических каркасах для ускоренной регенерации тканей. Медицинские системы будут потребителями полученных результатов как в области создания более управляемых диагностических и операционных систем, так и при обеспечении повышения эффективности, так называемой «персонализированной медицины» в области производства нового типа лекарственных препаратов.

С усложнением систем ожидается, что требования к свойствам нанотрубок будут возрастать, тогда как себестоимость самого «чистого продукта» будет снижаться. Соответственно функционализация и цена композитов на их основе будут возрастать. При этом области применения находятся в широком диапазоне: от создания одномолекулярных сенсорных структур, до строительных материалов.

Следующее поколение продуктов с использованием углеродных нанотрубок в наномеханических системах, электродах суперконденсаторов, электрокабелях, структурных композитах применяемых для аэрокосмической и автомобильной отраслей, фотоэлектрических устройствах, прозрачных проводящих пленках, полевых транзисторах, гибкой электронике и системах доставки лекарственных средств, по мнению экспертов Федерального реестра, в течение ближайшего десятилетия будет приносить значительное увеличение доходов игроков рынка [9].

*Статья подготовлена по материалам научно-исследовательской работы, выполненной ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ по заданию № 2.39.2016/НМ Министерства образования и науки России на выполнение работ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности.*

### **Список литературы**

1. Available at: <http://www.nanowerk.com> «Global carbon nanotubes market – industry beckons».
2. Графеновый флагман Graphene Flagship. Available at: <http://graphene-flagship.eu>.

3. Available at: <http://www.gartner.com>.
4. Ferrari\_Nanoscale, 2015.
5. Мищенко С.В., Ткачев А.Г. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.
6. Беликов Д.В., Марышев Е.А., Миронов Н.А. Проблемы создания и внедрения перспективных материалов для системы вооружения – взгляд экспертов Федерального реестра научно-технической сферы / М.: Иноватика и экспертиза: науч. тр. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ. Вып. 2 (17), 2016.
7. Carbon-Based Electronics: Researchers Develop Foundation for Circuitry and Devices Based on Graphite March 14, 2006. Available at: [gtrsearchnews.gatech.edu](http://gtrsearchnews.gatech.edu).
8. Глобальные технологические тренды / М.: Трендлеттер НИУ ВШЭ. Вып. 3, 2015.
9. Аналитические материалы по управлению, финансированию и перспективам развития сферы науки и технологий за рубежом в приоритетном направлении научно-технического развития «Новые материалы и индустрия наносистем». Научно-технический отчет, г. Москва, 2015 г. Государственная регистрация № 115062510025. Место хранения – ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, инв. № 603. Зарегистрирован в Единой государственной информационной системе учета НИОКР. Available at: [www.rosrid.ru](http://www.rosrid.ru).

### References

1. Available at: <http://www.nanowerk.com> «Global carbon nanotubes market – industry beckons».
2. Graphene Flagship. Available at: <http://graphene-flagship.eu>.
3. Available at: <http://www.gartner.com>.
4. Ferrari\_Nanoscale, 2015.
5. Mishchenko S.V., Tkachev A.G. (2008) *Uglerodnye nanomaterialy. Proizvodstvo, svoystva, primeneniye* [Carbon nanomaterials. Production, properties, application] *Mashinostroeniye* [Mashinostroeniye Publishers], Moscow, 320 p.
6. Belikov D.V., Maryshev E.A., Mironov N.A. (2016) *Problemy sozdaniya i vnedreniya perspektivnykh materialov dlya sistemy vooruzheniya – vzglyad ekspertov Federal'nogo reestra nauchno-tekhnicheskoy sfery* [Problems of creation and implementation of advanced materials for weapon systems – the experts of the Federal Roster of scientific and technological sphere] *Innovatika i ekspertiza* [Innovation and expert examination: scientific works of SRI FRCEC]. Moscow. Vol. 2 (17).
7. Carbon-Based Electronics: Researchers Develop Foundation for Circuitry and Devices Based on Graphite March 14, 2006. Available at: [gtrsearchnews.gatech.edu](http://gtrsearchnews.gatech.edu).
8. *Global'nye tekhnologicheskie trendy* [Global technology trends]. *Trendletter NIU VShE* [Trendletter HSE]. Moscow. Vol. 3, 2015.
9. *Analiticheskie materialy po upravleniyu, finansirovaniyu i perspektivam razvitiya sfery nauki i tekhnologii za rubezhom v prioritetnom napravlenii nauchno-tekhnicheskogo razvitiya «Novye materialy i industriya nano-sistem»* [Analytical materials concerning the management, financing and prospects of development of science and technology abroad in priority scientific and technological development «New materials and industry of nanosystems»] *Nauchno-tekhnicheskiiy otchet, g. Moskva, 2015 g. Gosudarstvennaya registratsiya No. 115062510025. Mesto khraneniya – FGBNU NII RINKTsE, inv. No. 603. Zaregistririvan v Edinoi gosudarstvennoy informatsionnoy sisteme ucheta NIOKR* [Technological report, Moscow, 2015. State registration No. 115062510025. The storage location is Sri FRCEC, inv. No. 603. Registered in the Unified state information accounting system of research and development]. Available at: [www.rosrid.ru](http://www.rosrid.ru).