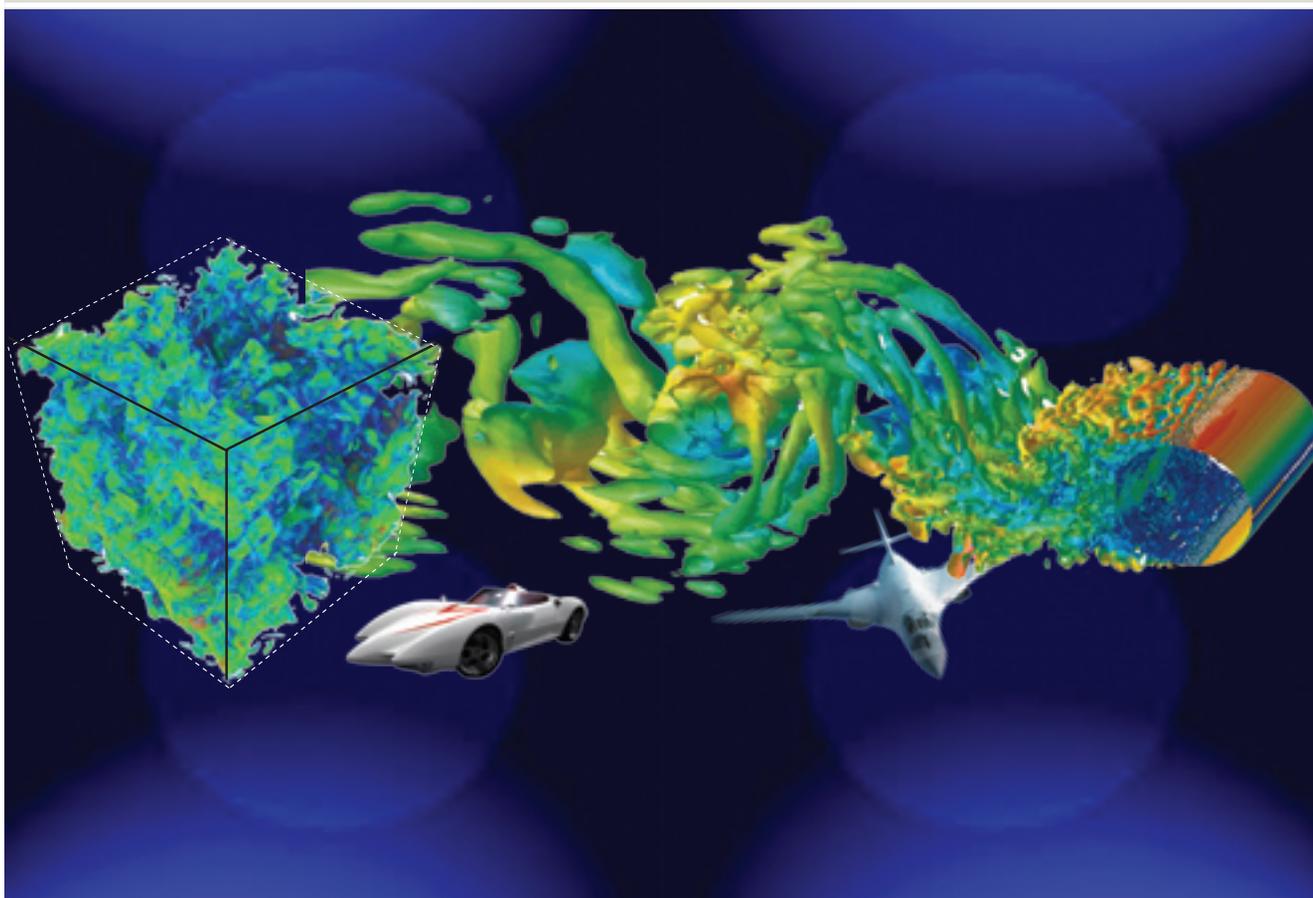


# Прогнозирование развития новых материалов с использованием методов Форсайта<sup>1</sup>

К.О. Вишнеvский\*, О.И. Карасев\*\*



**Новые материалы — одно из перспективных научно-технологических направлений, от которого зависит развитие ключевых секторов экономики. Его будущее стало предметом исследований в ряде зарубежных Форсайт-проектов.**

**Свой вклад в данный процесс внес Институт статистических исследований и экономики знаний (ИСИЭЗ) ГУ-ВШЭ, разработав серию дорожных карт по оценке перспектив углеродных волокон — одной из наиболее многообещающих областей новых материалов.**

\* Вишнеvский Константин Олегович — инженер, Институт статистических исследований и экономики знаний, Государственный университет — Высшая школа экономики. E-mail: kvishnevsky@hse.ru

\*\* Карасев Олег Игоревич — заместитель директора, Международный научно-образовательный Форсайт-центр, Институт статистических исследований и экономики знаний, Государственный университет — Высшая школа экономики. E-mail: okarasev@hse.ru

<sup>1</sup> Статья подготовлена по результатам поисковой научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

## Исследования в сфере новых материалов

Тема разработки и внедрения новых перспективных материалов в последние десятилетия неизменно привлекала к себе внимание исследователей будущего. Первопроходцем в прогнозировании развития материаловедения явилась Япония, где раз в пять лет начиная с 1971 г. проводится масштабное экспертное исследование Дельфи. В подготовке 8 японского прогноза [The 8th Science and Technology Foresight Survey, 2005] приняли участие в общей сложности 2300 экспертов, а его горизонт составил 30 лет (до 2035 г.).

В рамках этого проекта экспертам было впервые предложено оценить научные исследования и технологии в области наноматериалов. По этому направлению в первом раунде опроса участвовали 214 экспертов, во втором — 179.

Предметом экспертизы стал перечень перспективных продуктов и технологий, объединенных в 70 приоритетных направлений (в составе раздела «Нанотехнологии и материалы»). Он включал такие продукты, как легкие композиционные материалы на основе углеродных нанотрубок, изоляционные материалы, керамические импланты и др.

Исследование позволило сформулировать набор конкретных рекомендаций по формированию политики в сфере новых материалов. По оценкам экспертов, первоочередное значение для развития компьютерного моделирования наноматериалов приобретает совершенствование подготовки кадров. Предложенный комплекс мер лег в основу определения приоритетов Базового научно-технологического плана Японии (Science and Technology Basic Plan).

Одним из первых и одновременно наиболее масштабных европейских исследований, посвященных развитию сектора перспективных материалов, стал британский Форсайт, который был выполнен учеными Университета Манчестера в 1995 г. с использованием метода Дельфи [Loveridge et al., 1995]. В экспертных процедурах, предусматривавших двухэтапный опрос и проведение панельных дискуссий по его результатам, приняли участие порядка трех тысяч экспертов.

Исследование было нацелено на формирование у представителей науки и бизнеса четкого представления о будущем рынков и технологий, обсуждение направлений их дальнейшего развития, информирование широкого круга заинтересованных лиц о передовых разработках, в том числе в области новых материалов. В ходе Форсайта были выявлены ключевые факторы, определяющие научно-технологическое развитие на период до 2015 г.; осуществлена оценка новых рыночных потребностей и возможностей их удовлетворения за счет внедрения инновационных технологий; выделены необходимые технологические решения для производства перспективных продуктов.

Авторы исследования вычленили 1207 тем, характеризующих конкретные технологические направления. Темы были классифицированы по 15 секторам: «Аэрокосмическая отрасль и оборона», «Энергетика», «Информационные технологии и электроника» и т. п. В структуре исследования в качестве само-

## Глоссарий

**Дорожная карта** — обобщающий документ, который отражает многоуровневую систему стратегического развития предметной области в рамках единой временной шкалы и содержит показатели экономической эффективности перспективных технологий и продуктов, обладающих высоким потенциалом спроса и привлекательными потребительскими свойствами.

**Углеродное волокно (углеволокно, УВ)** — наноструктурированный органический материал, содержащий 92–99,99% углерода.

**Углеволокнистые композиционные материалы (компози́ты)** — структуры, образованные комбинацией углеродных волокон как армирующих элементов и связующего вещества (матрицы).

**«Ретрополяция» (backcasting)** — метод стратегического прогнозирования, позволяющий на основании экспертных оценок создать возможную картину будущего, а затем определить альтернативные пути его достижения (подход «от будущего к настоящему»).

**«Слабые сигналы» (weak signals)** — информация качественного характера о событии (явлении), которое распознается как неочевидная возможность или угроза в будущем. «Слабый сигнал» побуждает тем или иным образом учитывать будущую динамику события (явления), формировать систему действий для стимулирования или препятствования его развитию.

**Wild cards** — события, которые имеют низкую вероятность наступления, но если они происходят, то оказывают серьезное влияние на дальнейший ход событий.

стоятельного направления был предусмотрен раздел «Материалы», где рассматривались не только новые продукты, но и возможности их практического использования. Примером принятого подхода служит, например, «промышленное применение высокотемпературных сверхпроводников в системах хранения энергии»: акцент в этой формулировке делается как на технологическую составляющую, так и на конечное использование инновационной разработки. К работе были привлечены главным образом исследователи из академической сферы (14% от общей численности экспертов), специалисты промышленных лабораторий (21%), менеджеры по исследованиям (16%), эксперты по корпоративной стратегии (7%), производственники и бизнесмены (по 3%).

В ходе исследования были идентифицированы 80 перспективных направлений применения новых материалов, сгруппированных по 16 областям. Среди них — термостойкие материалы (9 тем из 80); медицинские (8) и конструкционные (4) материалы; материалы для электроники (8) и оптоэлектроники (4); снижение веса изделий (6), обработка материалов (12). Признаками для группировки выступали свойства материалов и область их применения.

В первом раунде Форсайта экспертиза по разделу новых материалов была проведена с участием 180 специалистов. Второй раунд опроса охватил 80 человек. По итогам обобщения экспертных мнений наиболее важными были признаны следующие направления: компактные, легкие и надежные перезаряжаемые батареи, способные обеспечить работу офисного оборудования в течение 24 часов; материалы для топливных элементов; материалы для временной фиксации костей; импланты. Начало их использования ожидалось экспертами в достаточно скором времени — до 2004 г., — однако не всем этим прогнозам было суждено сбыться.

Следующий крупный Форсайт в Европе — «Дельфи-98» [Cuhls et al., 1998] — стартовал в Германии в 1996 г. В его основе лежал перечень из 1070 тем, классифицированных по 12 разделам (информатика и связь, сфера услуг, энергия и ресурсы, космос и т. д.). Исследование проводилось в два этапа с участием примерно семи тысяч специалистов — представителей науки, бизнеса, некоммерческих организаций.

Германский проект предусматривал решение широкого круга задач, связанных с определением приоритетных траекторий развития науки и технологий. Его организаторы стремились повысить уровень информированности общества о перспективных научно-технологических тенденциях и оказать содействие бизнесу и государству в формировании стратегий развития.

В отличие от британского Форсайта, где темы формулировались независимо от других аналогичных проектов, авторы германского прогноза позаимствовали часть тем из японских опросов Дельфи. Иной была и группировка тем исследования. Два раздела «Химия» и «Материалы», которые британскими специалистами рассматривались отдельно, в «Дельфи-98» были объединены в одно направление — «Химия и материалы». В него вошли 104 продукта: жаростойкие полимеры, композиты-биомиметики, лигнин как перспективное сырье для химической промышленности и др.

В первом раунде опроса по направлению «Химия и материалы» приняли участие 260 экспертов, во втором — 206. Как и в японских Форсайтах, в этом проекте была предпринята попытка сформулировать перечень конкретных мер, необходимых для успешного развития передовых технологий и продуктов. В числе таких мер выделялись повышение качества образования, международная кооперация, улучшение инфраструктуры исследований и т. д.

Проблематика новых материалов нашла отражение не только в зарубежных, но и в российских Форсайт-исследованиях, в частности в долгосрочном прогнозе научно-технологического развития Российской Федерации, подготовленном по заказу Минобрнауки России с участием ИСИЭЗ ГУ–ВШЭ в 2007–2009 гг.

Целью работы было определение важнейших научно-технических результатов, которые могут быть достигнуты в период до 2025 г., выявление ключевых технологий и перспективных рыночных ниш, где Россия могла бы занять прочные конкурентные позиции. В рамках проекта осуществлена оценка потенциальных экономических и социальных эффектов, связанных с развитием новых технологий, и предложены

рекомендации по мерам научно-технической и инновационной политики, способствующим опережающему развитию наиболее важных технологических направлений.

Исследование проводилось по методу Дельфи и охватило в общей сложности свыше двух тысяч экспертов в первом туре и более тысячи — во втором. Участники опроса представляли ведущие научно-исследовательские центры и производственные организации по всем важнейшим направлениям развития науки и технологий. Таких направлений было выделено девять:

- Информационно-телекоммуникационные системы
- Индустрия наносистем и материалов
- Живые системы
- Медицина и здравоохранение
- Рациональное природопользование
- Энергетика и энергосбережение
- Производственные системы и промышленная инфраструктура
- Авиационно-космические и транспортные системы
- Безопасность.

Вопросам развития материаловедения был посвящен раздел «Индустрия наносистем и материалов». В первом раунде экспертизы по этому направлению приняли участие 319 специалистов, во втором — 145.

Исследование ИСИЭЗ ГУ–ВШЭ показало высокую перспективность полимерных материалов, кристаллических и наноструктурированных металлических материалов, материалов для систем связи, в том числе для волоконной оптики, фильтров и мембран на основе наноматериалов [Соколов, 2009]. Существенным его результатом стало создание научной, методической и организационной базы для проведения Форсайт-исследований в полном соответствии с передовой зарубежной практикой.

## Метод дорожных карт

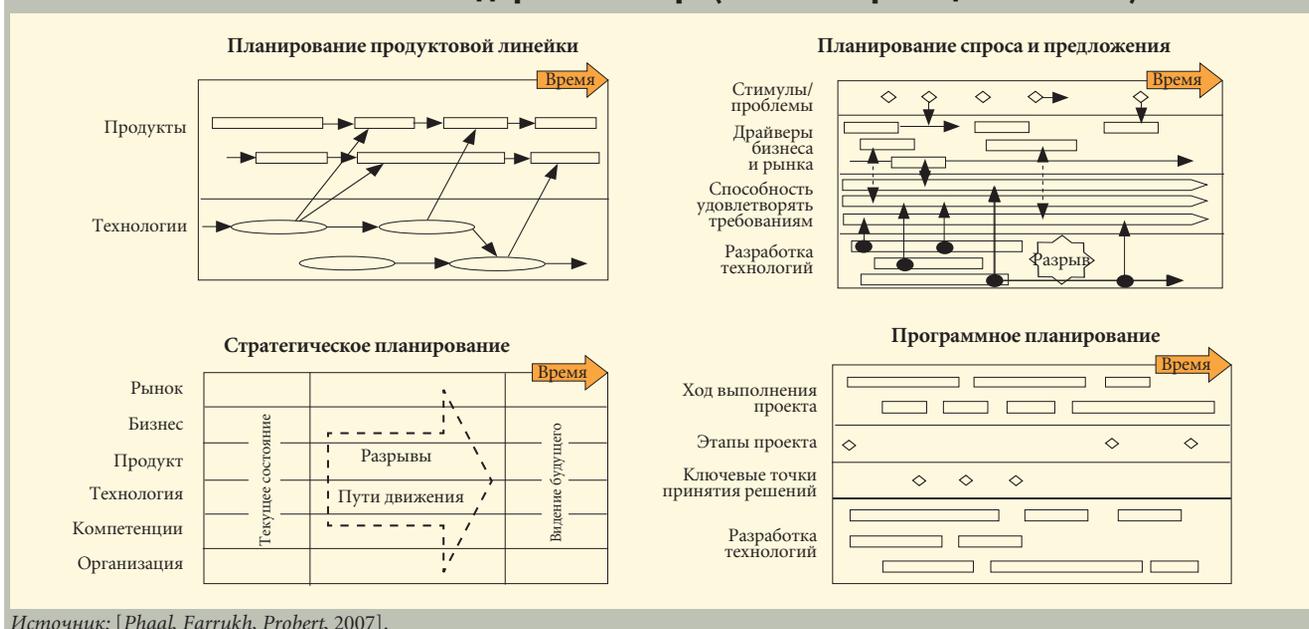
В последние годы методология Форсайта активно развивается в сторону углубленного изучения приоритетов развития, вплоть до формулирования конкретных рекомендаций по поддержке инновационных направлений. Для этого все чаще используется метод дорожных карт, и прогнозные исследования в сфере новых материалов не являются в этом смысле исключением.

Дорожная карта как метод стратегического планирования была впервые применена компанией Motorola [Willyard, McClees, 1987]. Впоследствии этот подход нашел широкое применение в прогнозных исследованиях корпоративного, отраслевого и регионального уровней.

Согласно классификации, предложенной Р. Фаалем (Университет Кембриджа), принято выделять несколько типов дорожных карт (рис. 1). Как будет показано ниже, все они в той или иной мере применяются сегодня и для сферы новых материалов.

Дорожная карта типа «планирование продуктовой линейки» («product planning») представляет технологии и продукты в рамках временной шкалы, что

Рис. 1. Основные типы дорожных карт (по классификации Р. Фааля)



Источник: [Phaal, Farrukh, Probert, 2007].

позволяет прогнозировать появление перспективных продуктов и выяснять, какие технологии необходимо развивать для их создания. Подход «планирование спроса и предложения» («service/capability planning») дает возможность связать рыночные драйверы и вызовы рынка с производственными мощностями и технологическим потенциалом для удовлетворения потребностей рынков. Дорожная карта «стратегическое планирование» («strategic planning») учитывает ресурсное обеспечение для реализации технологических решений, необходимых для создания продуктов, которые в будущем будут востребованы рынком. Она также способствует выявлению возможных угроз для развития технологий и идентификации секторов, характеризующихся технологическим отставанием, которое предстоит ликвидировать для создания инновационных продуктов. Карта «программного планирования» («program planning») прежде всего ориентируется на реализацию стратегии и тесно связана с проектным планированием, в частности с программами исследований и разработок (ИиР).

Среди примеров Форсайт-проектов по методу дорожных карт заслуживает внимания европейский проект NanoRoadSME<sup>1</sup>, выполненный под эгидой Еврокомиссии в целях развития трансфера знаний и технологий между научными центрами и предприятиями малого бизнеса в странах ЕС. В рамках исследования были разработаны технологические карты для оценки перспектив внедрения нанотехнологий в четырех секторах экономики: автомобильной, аэрокосмической промышленности, медицине и энергетике. При этом предполагалось проанализировать наиболее значимые инновационные разработки в рассматриваемых областях применения наноматериалов, предоставить малым предприятиям наглядный инструмент для ориентации в большом массиве новых технологий с учетом их потенциальной перспективности и возможностей коммерциализации.

По классификации Р. Фааля, указанная серия дорожных карт относится к наиболее простому виду — «планирование продуктовой линейки» — и отражает последовательность этапов развития продуктов и технологий, устанавливая связи между ними. Подобные карты позволяют показать, какие перспективные продукты и в какой момент времени могут или должны быть созданы и какие для этого нужны технологические решения. Тем самым дорожная карта «связывает» разные элементы технологической цепочки — разработку технологий и последующую организацию производства на их основе.

Визуальное представление европейских дорожных карт по наноматериалам отражает этапы инновационного цикла с указанием ожидаемой продолжительности и сроков завершения каждого из них. На рис. 2 показан пример визуализации таких этапов — разработки технологии, создания промышленного образца, организации опытного и промышленного производства, вывода продукта на рынок. Благодаря тому, что все элементы дорожной карты размещены на единой шкале времени, видно, что разные типы перспективных материалов находятся на различных стадиях готовности к массовому производству. Так, наноструктурированные пленки из полиметил-метакрилата (акриловое стекло, PMMA) уже в 2006 г. были выведены на рынок, тогда как полимеры с углеродными наночастицами, по мнению экспертов, могут появиться на рынке не ранее 2015 г.

Для приоритетных материалов был также проведен анализ динамики себестоимости производства инновационных продуктов в долгосрочной перспективе (рис. 3). Это позволило предложить компаниям ориентиры относительно экономической целесообразности реализации технологических проектов в соответствующих областях. На схеме наглядно показано, что себестоимость ряда инновационных продуктов будет существенно снижаться в ближайшие годы. Самые

<sup>1</sup> <http://www.nanoroad.de/index.php?topic=download>

Рис. 2. Оценка этапов инновационного цикла для перспективных продуктов в европейской дорожной карте по наноматериалам

	Легенда														
	опытное производство (ОП)			промышленное производство (ПП)						выход на рынок (ВР)					
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Оксид алюминия (Al2O3) с нанозернами		ПП													ВР
Графитовые частицы															ВР
Водоотталкивающие наночастицы на базе коллоидальной двуокиси кремния			ПП												ВР
Сплав железа, меди, ниобия, кремния и бора (Fe-Cu-Nb-Si-B)		ПП													ВР
Никелевые порошки с графитовым покрытием															ВР
Никель-титан (Ni-Ti) с нанозернами			ОП			ПП									ВР
Поли (метил-метакрилатные) [PMMA] наноструктурированные пленки															ВР
Поли (октадецилсилоксановые) (PODS) нанослои		ОП	ПП												ВР
Поли [стирол- <i>b</i> - (этилен-бутилен)- <i>b</i> -стирол] (SEBS)			ПП												ВР
Поли [стирол- <i>b</i> - (этилен-бутилен)- <i>b</i> -стирол] + C15H32			ОП	ПП											ВР
Полиакрилонитриловые (PAN) наноструктуры			ПП												ВР
Полианилиновые (PANI) нанотрубки			ОП	ПП											ВР
Полианилин-SnO2 (PANI-SnO2) и Полианилин-TiO2			ПП												ВР
Полиэтиленовые или полипропиленовые (PE-PP) матрицы		ОП	ПП												ВР
Полимеры с углеродными наночастицами/фильтрами (основной материал)				ОП			ПП								ВР
Полиолефин/глина				ПП											ВР
Полистирол-блок-поли (4-винилпиридин) (PS-P4VP) нанопроволоки		ОП	ПП												ВР
POSS наноструктурированные катализаторы		ОП	ПП												ВР

Источник: [Roadmap Report Concerning the Use of Nanomaterials in the Automotive Sector, 2006].

высокие темпы, согласно выводам исследования, будут характерны для полимеров с углеродными нанотрубками, стоимость которых должна снизиться примерно в 10 000 раз за ближайшее десятилетие. Однако для других материалов, например, нанокомпозитов типа полиолефин/глина, этот показатель сохранится на нынешнем уровне, а по некоторым другим (нанозерна оксида алюминия и т. п.) даже ожидается его рост.

В отличие от рассмотренных выше примеров Форсайт-исследований в дорожной карте применялся иной принцип группировки тем — по областям применения, из чего, в свою очередь, вытекают различные требования к новым материалам. Для карты характерна и более детальная оценка перспектив по отдельным технологическим направлениям. В то же время ее отличительная черта — более узкий тематический охват: спектр областей, изучаемых в рамках опросов Дельфи, многократно шире. Поэтому подобные исследования нельзя считать взаимоисключающими, они, скорее, дополняют друг друга. Например, по результатам построения европейской карты по наноматериалам было выяснено, что наиболее перспективным на-

правлением являются легкие функциональные материалы, а из британского Дельфи следовало, что наибольшее внимание необходимо уделить таким областям, как материалы для источников энергии и медицинских целей.

Сравнение ведущих мировых Форсайт-проектов показывает, что в числе самых перспективных направлений в сфере новых материалов чаще всего выделяются углеродные волокна и композиты на их основе. Применительно к ним известны более детальные стратегические документы, которые также могут быть отнесены к категории дорожных карт. В первую очередь, следует назвать стратегические планы компаний — разработчиков и производителей углеродных материалов. Лидер мирового рынка компания Toray поддерживает собственную стратегию в этой области — «Toray's strategy for carbon fiber composite materials»<sup>2</sup>. В этом документе рассматривается ретроспективная динамика рынков углеродных волокон и продуктов, в производстве которых такие волокна используются, и дается прогноз спроса на углеволокно для основных сегментов рынка. Такой подход,

Рис. 3. Оценка динамики себестоимости наноматериалов в европейской дорожной карте

	Легенда									
	Краткосрочный период			Среднесрочный период				Долгосрочный период		
	Чем ярче цвет, тем ниже стоимость									
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	
<b>Предположительная стоимость материалов</b>										
Оксид алюминия (Al2O3) с нанозернами	~ 200 евро за кг (для нанопорошков)			~ 220 евро за кг				~ 230 евро за кг		
Графитовые частицы		~ 500 евро за т								
Водоотталкивающие наночастицы на базе коллоидальной двуокиси кремния		~ 10 евро за кг		~ 5 евро за кг				~ 5 евро за кг		
Сплав железа, меди, ниобия, кремния и бора (Fe-Cu-Nb-Si-B)										
Никелевые порошки с графитовым покрытием		~ 1920 евро за кг		~ 1500 евро за кг				~ 1200 евро за кг		
Никель-титан (Ni-Ti) с нанозернами		~ 1300 евро за кг						~ 200 евро за кг		
Поли (метил-метакрилатные) [PMMA] наноструктурированные пленки		~ 11000 евро за кг		~ 9000 евро за кг				~ 6500 евро за кг		
Поли (октадецилсилоксановые) (PODS) нанослои		~ 23000 евро за кг		~ 16000 евро за кг				~ 12000 евро за кг		
Поли [стирол- <i>b</i> - (этилен-бутилен)- <i>b</i> -стирол] (SEBS)		~ 38000 евро за кг		~ 20000 евро за кг				~ 15500 евро за кг		
Поли [стирол- <i>b</i> - (этилен-бутилен)- <i>b</i> -стирол] + C15H32		~ 35000 евро за кг		~ 27000 евро за кг				~ 20000 евро за кг		
Полиакрилонитриловые (PAN) наноструктуры		~ 47000 евро за кг		~ 39000 евро за кг				~ 29000 евро за кг		
Полианилиновые (PANI) нанотрубки		~ 25000 евро за кг		~ 19000 евро за кг				~ 15000 евро за кг		
Полианилин-SnO2 (PANI-SnO2) и полианилин-TiO2		~ 27000 евро за кг		~ 20000 евро за кг				~ 16000 евро за кг		
Полиэтиленовые или полипропиленовые (PE-PP) матрицы		~ 7,5 евро за кг		~ 7,5 евро за кг				~ 5 евро за кг		
Полимеры с углеродными наночастицами/фильтрами (основной материал)		~ 50000 евро за кг УНТ		~ 10000 евро за кг УНТ				~ 50 евро за кг УНТ		
Полиолефин/глина		~ 5-10 евро за кг		~ 5 евро за кг				~ 5 евро за кг		
Полистирол-блок-поли (4-винилпиридин) (PS-P4VP) нанопроволоки		~ 50000 евро за кг		~ 43000 евро за кг				~ 56000 евро за кг		
POSS наноструктурированные катализаторы		~ 1000 евро; 750-5000 за кг		~ 100 евро; 100-500 за кг				~ 50 евро; 20-100 за кг		

Источник: [Roadmap Report Concerning the Use of Nanomaterials in the Automotive Sector, 2006].

<sup>2</sup> [http://www.toray.com/ir/pdf/lib/lib\\_a136.pdf](http://www.toray.com/ir/pdf/lib/lib_a136.pdf)

согласно Р. Фаалу, можно отнести к типу «планирование спроса и предложения».

В стратегии компании Toyaу определены перспективные инновационные приложения волокон подобного типа и композитов на их базе. Рассмотрены ключевые драйверы спроса на наиболее важные продукты, в том числе планы автопроизводителей по снижению выбросов углекислого газа за счет уменьшения массы автомобилей, что, в свою очередь, достигается растущим применением композитов в этой отрасли. Кроме того, представлено сопоставление возможностей компании и конкурентов, что роднит эту карту с вышеупомянутым подходом «стратегическое планирование».

Помимо корпоративных дорожных карт широко известен проект Министерства энергетики США по снижению стоимости углеродных волокон «Low cost carbon fiber»<sup>3</sup>, который представляет собой некоторую вариацию метода «планирование продуктовой линейки». Это прогнозное исследование ориентировано на поиск наиболее экономичного сырья для производства углеродных волокон и путей снижения затрат на каждой стадии производства углеволокна и конечных продуктов на его базе. Наряду с ценовыми показателями, в качестве целевых ориентиров выступают физико-химические свойства материала.

### Построение дорожных карт: практика ИСИЭЗ

Следует отметить, что значимость углеродных волокон для обеспечения конкурентоспособности экономики чрезвычайно велика и в нашей стране. Этот тезис был, в частности, подчеркнут на заседании Совета генеральных и главных конструкторов при Председателе Правительства РФ 9 июня 2010 г.<sup>4</sup> В связи с этим остановимся подробнее на опыте разработки дорожной карты «Использование нанотехнологий в производстве продуктов из углеродных волокон», выполняемой Международным научно-образовательным Форсайт-центром ИСИЭЗ ГУ–ВШЭ по заказу Государственной корпорации «Роснано» в рамках целой серии Форсайт-исследований, направленных на определение приоритетных направлений развития нанотехнологий в России.

Построение дорожных карт для сферы нанотехнологий опирается не только на зарубежный опыт, но, прежде всего, на ясное понимание специфики российского рынка и научно-технологического потенциала.

Как и дорожная карта типа «планирование продуктовой линейки», документ, подготовленный специалистами ГУ–ВШЭ, позволяет предвидеть появление перспективных продуктов и выявить технологии, необходимые для их создания. Аналогично варианту «планирование спроса и предложения», карта дает возможность сопоставить драйверы рыночного развития с имеющимся производственно-технологическим потенциалом.

**Дорожная карта «Планирование продуктовой линейки» описывает перспективные технологии и продукты в рамках временной шкалы и позволяет прогнозировать их появление. Карта «Планирование спроса и предложения» учитывает рыночные драйверы и вызовы при планировании производства и оценке технологического потенциала**

Использование подхода «стратегическое планирование» позволило представить дорожную карту как документ, отражающий ресурсное обеспечение для реализации технологических решений, которые, в свою очередь, позволяют получить востребованные рынком продукты. При этом анализируются возможные угрозы для развития технологий, выявляются области технологического отставания, которое требуется преодолеть для создания инновационных продуктов.

По принципу «программного планирования», дорожная карта ориентируется на реализацию стратегии заказчика — ГК «Роснано», предусматривая интеграцию выводов в проектную деятельность, в том числе посредством развития активной модели формирования инвестиционных проектов.

В процессе исследования были учтены методические подходы, применявшиеся при разработке наиболее известных продуктовых дорожных карт. Помимо проектов, упомянутых выше, предметом детального анализа были методики подготовки таких документов, как «Международная технологическая дорожная карта для полупроводников» (The International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS)<sup>5</sup>, серия дорожных карт Министерства энергетики США по светодиодным технологиям «Solid-State Lighting Research and Development»<sup>6</sup> и др.

Исследование ИСИЭЗ ГУ–ВШЭ опиралось на обширную экспертную базу, в него были вовлечены представители более 40 ключевых предприятий отрасли, профильных НИИ, вузов. К экспертам, участвовавшим в проекте, предъявлялись жесткие квалификационные требования: представительство ведущих организаций, осуществляющих ИиР, производство и потребление углеволокна и продуктов на его основе; наличие объективных результатов, подтверждающих квалификацию эксперта (ученая степень, публикации с высоким индексом цитирования, регулярное участие в ведущих научных мероприятиях в данной области и др.); известность в профессиональной среде. Сформированная таким образом экспертная группа включала 90 человек, которые представляли все ведущие российские организации, занимающиеся разработкой и производством углеродных волокон, а также ряд организаций — потребителей данной продукции.

<sup>3</sup> Материалы проекта доступны по адресу <http://www.eere.energy.gov/>

<sup>4</sup> <http://www.compozit.su/news/article/index.html%3FnewsId=16.html>

<sup>5</sup> <http://www.itrs.net/Links/2009ITRS/Home2009.htm>

<sup>6</sup> <http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/techroadmaps.html>

Рис. 4. Последовательность методов Форсайта при разработке дорожной карты «Использование нанотехнологий в производстве продуктов из углеродных волокон»



В подготовке карты активно участвовали зарубежные эксперты.

Логика формирования карты предполагала применение целого комплекса методов Форсайт-исследований в определенной последовательности (рис. 4).

Как видно из представленной схемы, экспертные процедуры являются центральным элементом этого процесса. Помимо сбора разнообразной первичной информации, они позволяют решить важную зада-

чу — согласовать позиции организаций, задействованных на разных этапах технологической цепочки, при выработке инновационной стратегии.

Каждый из использованных методов Форсайта вносит свой специфический вклад в достижение общей цели исследования (табл. 1), а сама дорожная карта предстает как заключительный документ, интегрирующий результаты самых разных аналитических и экспертных процедур.

Табл. 1. Характеристика методов Форсайта, примененных при разработке дорожной карты «Использование нанотехнологий в производстве продуктов из углеродных волокон»

Метод	Вклад в достижение цели исследования
Семинары	<ul style="list-style-type: none"> <li>коммуникативные связи между экспертами</li> <li>достижение согласованного представления о перспективах развития продуктовой группы и возможных инновационных стратегиях в этой области</li> <li>верификация основных положений и выводов дорожной карты</li> </ul>
Обзоры литературы	<ul style="list-style-type: none"> <li>изучение существующих методик построения дорожных карт, определение лучших практик</li> <li>сбор исходной информации для описания перспективных рынков, продуктов, технологий, научно-технических решений</li> </ul>
Библиометрика и патенты	<ul style="list-style-type: none"> <li>выявление современных тенденций и передовых разработок в предметной области</li> <li>подготовка предварительного перечня российских и зарубежных экспертов для формирования экспертной группы</li> </ul>
Бенчмаркинг	<ul style="list-style-type: none"> <li>выделение ключевых проблем развития продуктовой группы углеродных волокон в России в контексте общемировых тенденций</li> <li>разработка перечня перспективных видов углеродных волокон</li> </ul>
Интервью	<ul style="list-style-type: none"> <li>формирование перечня наиболее перспективных продуктов с указанием используемых при их производстве углеродных волокон и композитов, а также критически важных технологий производства</li> <li>сбор информации о ключевых характеристиках и перспективах развития углеродных волокон и композитов</li> </ul>
Панели экспертов	<ul style="list-style-type: none"> <li>верификация перечня наиболее важных технологий и продуктов</li> <li>оценка и обсуждение перспективной динамики рынков, факторов, влияющих на рыночное развитие в долгосрочной перспективе</li> </ul>
Количественные сценарии и сценарные семинары	<ul style="list-style-type: none"> <li>исходные данные для прогнозов развития сегментов потребления углеродных волокон и композитов на их основе</li> </ul>
Ретрополяция (backcasting)	<ul style="list-style-type: none"> <li>формирование представления о желаемом состоянии предметной области</li> </ul>
Сканирование	<ul style="list-style-type: none"> <li>выделение основных характеристик внешней среды развития производства углеродных волокон и композитов</li> </ul>
Кросс-импакт анализ	<ul style="list-style-type: none"> <li>разработка траекторий «НИОКР — производство — рынок»</li> <li>оценка взаимосвязей между характеристиками продуктов и технологий, а также востребованными потребительскими свойствами в разных сегментах рынка</li> </ul>
SWOT-анализ	<ul style="list-style-type: none"> <li>выделение сильных и слабых сторон, оценка возможностей и угроз для развития отечественного производства углеволокна и композитов</li> </ul>
Wild cards и слабые сигналы	<ul style="list-style-type: none"> <li>выявление областей применения углеродных волокон, развитие которых потенциально может привести к возникновению новых крупных сегментов рынка</li> </ul>
Дорожная карта	<ul style="list-style-type: none"> <li>документ, обобщающий результаты всех предыдущих этапов исследования</li> </ul>
Семинары	<ul style="list-style-type: none"> <li>общественное обсуждение дорожной карты</li> <li>доведение сведений об основных результатах до широкого круга заинтересованных сторон</li> </ul>

Ряд методов Форсайта оказал наиболее сильное влияние на построение итоговой дорожной карты. Так, на базе аналитического обзора стратегических документов в сфере нанотехнологий был сформирован предварительный вариант визуального представления дорожной карты, выделены ключевые проблемы развития продуктовой группы, сформирован перечень перспективных видов углеродных волокон.

Затем последовали интервью с экспертами, для проведения которых привлекались высококвалифицированные интервьюеры, глубоко «погруженные» в проблему. Глубинные интервью позволили выявить позиции всех заинтересованных участников рынка, осуществляющих деятельность в области разработки, производства и использования углеродных волокон. Для их уточнения и согласования была проведена серия экспертных панелей, на которых обсуждались как значимые технологические проблемы, так и вопросы, связанные с ведением бизнеса в области новых материалов. По их итогам был составлен перечень важнейших технологий и продуктов, разработку которых целесообразно поддерживать в России, и подготовлены их детальные описания.

Значительное место в процессе исследования было отведено кросс-импакт анализу, который позволил оценить взаимосвязь между технологическими решениями, потребительскими свойствами продуктов и требованиями конечных потребителей. В результате были выявлены меры, необходимые для создания конкретных продуктов и стимулирования спроса в отдельных сегментах рынка потребления углеродных волокон.

Известно, что одним из основных методов Форсайта является сценарный анализ, позволяющий отразить многовариантность будущего. В процессе построения дорожной карты он использовался для формирования прогнозов объема рынка и анализа траекторий развития альтернативных технологий, конкурирующих с углеволокном в разных сегментах рынка.

Итоговый вариант дорожной карты «Использование нанотехнологий в производстве продуктов из углеродных волокон» охватывает четыре вида углеродных волокон, для которых существуют возможности практического освоения в долгосрочной перспективе (рис. 5):

- на основе полиакрилонитрильного (ПАН) волокна;
- на базе вискозного волокна;
- на основе пекового волокна;
- волокно из газовой фазы.

Согласно результатам исследования, для углеродных волокон на основе ПАН существует наиболее масштабный рынок — как массовых, так и специальных применений. Эксперты считают целесообразным использование углеродных волокон на базе вискозы в медицине, а также в тех областях, где это установлено нормативно. Волокна на основе пека имеют достаточно ограниченные области применения, главным образом специального характера (возможно сочетание волокон на базе ПАН и пека при производстве некоторых продуктов). Волокна из газовой фазы в перспективе имеют чрезвычайно широкий рынок, но эти разработки еще не вышли на стадию коммерциализации.

Карта анализирует тренды, касающиеся отдельных видов углеволокнистых композитов — не только широко распространенных в мире углепластиков, но и с узкоспециализированным применением. По итогам экспертного опроса выделены четыре вида углеволокнистых композитов, имеющих обширные перспективы промышленной реализации в долгосрочной перспективе (рис. 5):

- композиты с полимерной матрицей (углепластики);
- углерод-углеродные композиты;
- композиты с металлической матрицей;
- композиты с керамической матрицей.

Как оказалось, самым крупным является потенциальный рынок углепластиков (композитов с полимерной матрицей) за счет высоких физико-химических характеристик и относительной простоты изготовления.

Рис. 5. Общая схема производства конечных продуктов на основе углеродных волокон



Источник: ИСИЭЗ ГУ–ВШЭ.

Углерод-углеродные композиты, как ожидается, займут нишу специализированного применения, особенно в областях, где уже существует необходимый технологический задел (например, для производства тормозных дисков). Композиты с металлической матрицей будут применяться в авиационной промышленности, а с керамической матрицей — смогут использоваться в условиях высоких температур.

Композиционные материалы на базе углеродных волокон находят все более разнообразные приложения в летательных аппаратах и изделиях, для которых моменты инерции играют определяющую роль (центробежные накопители энергии и высокоскоростные центрифуги). Использование углеродных волокон эффективно также при создании глубоководных бурильных установок для освоения шельфа, что важно, например, при развитии нефтедобычи в зоне Арктики.

Исследование продемонстрировало целесообразность расширения сферы применения углеволокна в промышленности для изготовления оборудования с высокими рабочими характеристиками, в частности в автомобиле- (например, с целью значительного снижения веса автомобиля) и судостроении (главным образом, для обшивки корпуса).

Дорожная карта показала, что углеволокно может эффективно использоваться в производстве медицинских товаров (лечебные салфетки, инвалидные коляски), товаров для спорта и досуга.

Карта «Использование нанотехнологий в производстве продуктов из углеродных волокон» строилась по принципу послышной группировки ее элементов. Под *слоем* понимается совокупность однотипных элементов дорожной карты — продуктов, технологических решений, научных разработок и т. п. — которые рассматриваются в привязке к единой временной шкале. Это позволяет делать выводы о предположительных сроках появления инновационных технологий и продуктов, возможной динамике сегментов рынков углеродных волокон и о необходимости проведения тех или иных ИиР.

Так, слой, содержащий описание собственно различных типов углеродных волокон, дает представление о преимуществах и недостатках каждого из них с учетом потенциальной широты областей их применения. Применительно к ним выделены критические технологические задачи, решение которых требуется для инновационного развития этой области в России, и построен прогноз динамики наиболее значимых технико-экономических характеристик углеродного волокна, в том числе его цены.

Отдельный слой карты посвящен композитам, производимым на основе углеволокна. Для каждого вида волокон были выявлены наиболее перспективные материалы, которые могут быть получены на их базе (примером таких материалов являются широко распространенные в настоящее время углепластики). С участием экспертов для разных материалов определялся круг задач, которые предстоит решить для создания соответствующих производств в России.

На дорожной карте в виде самостоятельного слоя показаны конечные продукты, которые могут быть

созданы с применением разных видов углеродных волокон и композиционных материалов на их основе. Этот раздел карты очень важен с точки зрения изучения перспектив спроса на инновационные разработки. Например, для активно развивающегося сегмента ветроэнергетики требуется углеродное волокно на базе ПАН, позволяющее создавать легкие и прочные лопасти ветроэнергетических установок. Это значит, что определенный сегмент рынка будет формировать спрос на вполне конкретные виды волокон, которые нужны для создания подобных продуктов. Для каждого продукта проводилась оценка сроков ожидаемого выхода на рынок и перечня волокон и композитов, требуемых для производства.

Центральный слой карты — экспертная оценка долгосрочных перспектив развития рынка углеродных волокон по отдельным сегментам, как существующим в настоящее время, так и возникающим в перспективе. Учитывая долгосрочный характер прогноза, оценка развития рынка осуществлялась с помощью сценарного анализа. Карта отображает три возможных сценария развития рыночных сегментов — пессимистический, умеренный и оптимистический, — сформулированных после изучения факторов, которые будут определять будущее рынка углеволокна. Такие факторы весьма разнообразны — это и меняющиеся потребительские предпочтения, и нормативные ограничения, и даже политические факторы (например, необходимость присутствия в стратегически важных регионах предполагает разработку материалов, которые выдерживали бы экстремальные условия эксплуатации).

Исследование показало, что основная сфера применения углеродного волокна сегодня — это аэрокосмическая отрасль. Однако существуют тенденции к расширению его использования в других секторах — строительстве, энергетике, автомобильной промышленности. С помощью дорожной карты была выделена группа сегментов рынка, наиболее перспективных с точки зрения продвижения отечественных разработок. Критерии перспективности носили комплексный характер и учитывали стратегическую и социальную значимость той или иной отрасли, объемы и динамику рынка, конкуренцию, которую создают для углеволокна другие продукты, и т. п.

Большое внимание при разработке дорожной карты было уделено анализу альтернативных видов новых материалов, конкурирующих с углеволокном. В их числе рассматривались как инновационные композиты (например, базальтопластики на основе базальтовых волокон), так и традиционные материалы (например, алюминиевые сплавы).

Анализ технологических и рыночных перспектив производства углеродных волокон в России был дополнен изучением рисков, барьеров и ограничений, тормозящих развитие этой сферы. Примером такого риска является неопределенность ситуации с Байкальским целлюлозно-бумажным комбинатом, которая ставит под угрозу производство беленой целлюлозы: именно этот материал является сырьем для производства углеродных волокон на основе вискозы. Благодаря такому анализу, карта может служить своего рода инструментом «раннего предупреждения»

о возможных препятствиях, которые следует иметь в виду, осуществляя инвестиции в новую технологическую область.

Направления инновационного развития в сфере углеродных волокон, выявленные с помощью дорожной карты, могут быть проанализированы более глубоко. С этой целью в развитие карты для каждого сегмента рынка разрабатываются *маршруты*. Маршрут отображает последовательность мероприятий на каждом этапе технологической цепочки, обеспечивающих успешный выход на данный сегмент рынка. С его помощью идентифицируются направления ИиР, необходимые для развития характеристик углеродных волокон и композитов, их влияние на потребительские свойства продуктов и, в конечном счете — перспективы вывода продуктов с такими свойствами на рынок.

Указанные маршруты позволяют проанализировать всю технологическую цепочку для инновационных продуктов, начиная от ИиР и заканчивая организацией массового производства. Исходя из этого, можно оценить, какого рода продуктовую линейку следует формировать для успешного выхода на рынок и какой вклад может внести наука в создание таких продуктов.

Вместе с тем, учитывается, что маршруты выхода на разные рынки принципиально отличаются друг от друга. Например, для создания космической техники требуются материалы с экстремально высокими физико-химическими характеристиками. В то же время в области массового спорта важную роль играет низкая цена конечного изделия, которая обеспечивает его конкурентоспособность по сравнению с традиционными продуктами, уже существующими на рынке. Таким

образом, реализация двух указанных траекторий требует производства углеволокна с разными потребительскими свойствами, что, в свою очередь, предполагает решение разных технологических задач.

Разработка дорожной карты и соответствующих маршрутов позволила обобщить представления широкого круга экспертов о путях инновационного развития отрасли. Проект способствовал формированию согласованного видения направлений дальнейших действий на уровне всех ключевых организаций, относящихся как к сфере ИиР, так и к реальному сектору экономики.

Ожидается, что рассмотренный документ будет способствовать становлению гражданских рынков для продукции из углеродных волокон и поэтапному улучшению ее потребительских свойств с учетом спроса. За счет снижения цены углеродного волокна будет происходить расширение областей его применения. Повышение качества композиционных материалов, в свою очередь, позволит повысить конкурентоспособность отечественного углеродного волокна по сравнению с зарубежными аналогами, обеспечивая возможности создания новых видов конечных продуктов, в том числе летательных аппаратов нового поколения.

Подводя итоги, следует подчеркнуть, что российская практика, как и международная, свидетельствует о целесообразности развития Форсайт-исследований в сфере новых материалов. Причем эффективность такого рода работ будет напрямую зависеть от того, насколько их рекомендации найдут воплощение в конкретных управленческих решениях, касающихся не только определения общих приоритетов инновационного развития, но и механизмов их реализации, прежде всего в виде инвестиционных проектов. ■

- Бойкова М.В., Салазкин М.Г. (2008) Форсайт в Германии // Форсайт. № 1. С. 60–69.
- Бруммер В., Коннола Т., Сало А. (2009) Форсайт-исследование для разработки национальных стратегий «Финсайт-2015» // Форсайт. № 4. С. 56–65.
- Вишневский К.О. (2009) Целесообразность использования технологических дорожных карт как инструмента государственной инновационной политики // Инновационное развитие в современных рыночных условиях / Герасименко В.В., Градобоева В.В. (ред.). М.: Макс-Пресс. С. 16–26.
- Кинэн М. (2009) Технологический Форсайт: международный опыт // Форсайт. № 3. С. 60–67.
- Клейтон Э. (2009) Построение дорожных карт для развивающихся стран // Форсайт. № 1. С. 48–57.
- Клейтон Э. (2008) Технологические дорожные карты: инструменты для развития // Форсайт. № 3. С. 68–74.
- Кукушкина С.Н. (2007) Метод Дельфи в Форсайт-проектах // Форсайт. № 1. С. 68–73.
- Майлс Й. (2008) Разработка сценариев и дорожных карт для ключевых технологий: предупреждение наводнений и защита береговых территорий Великобритании // Форсайт. № 4. С. 50–59.
- Соколов А.В. (2009) Результаты исследования Дельфи // Форсайт. № 3. С. 40–58.
- Albright R.E., Kappel T.A. (2003) Roadmapping in the Corporation // Research Technology Management. № 42 (2). P. 31–40.
- Cuhls K., Blind K., Grupp H. (eds.) (1998) Delphi '98 Umfrage. Zukunft nachgefragt. Studie zur globalen Entwicklung von Wissenschaft und Technik. Karlsruhe.
- Loveridge D., Georghiou L., Nedeva M. (1995) United Kingdom Technology Foresight Programme, Delphi Survey: PREST, The University of Manchester. Manchester, UK.
- Phaal R., Muller G. (2009) An Architectural Framework for Roadmapping: Toward Visual Strategy // Technological Forecasting and Social Change. № 76. P. 39–49.
- Phaal R., Farrukh C., Probert D. (2001) T-Plan — The Fast-Start to Technology Roadmapping: Planning Your Route to Success // Institute for Manufacturing, University of Cambridge. Cambridge, UK.
- Phaal R., Farrukh C.J.P., Probert D.R. (2004) Technology Roadmapping — A Planning Framework for Evolution and Revolution // Technological Forecasting and Social Change. № 71. P. 5–26.
- Roadmap Report Concerning the Use of Nanomaterials in the Automotive Sector (2006) // Nanomaterial Roadmap 2015.
- The 8th Science and Technology Foresight Survey — Future Science and Technology in Japan, Delphi Report (2005). Science and Technology Foresight Center, National Institute of Science and Technology Policy. Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, Japan.
- Warren C.D. (2009) ORNL Carbon Fiber Technology Development. [http://www.ms.ornl.gov/PMC/carbon\\_fiber09/pdfs/C\\_David\\_Warren\\_ORNL.pdf](http://www.ms.ornl.gov/PMC/carbon_fiber09/pdfs/C_David_Warren_ORNL.pdf).
- Willyard Ch., McClees Ch. (1987) Motorola's Technology Roadmapping Process // Research Technology Management Magazine. Sept./Okt. P. 13–19.