

СЛОЖНЫЕ СИСТЕМЫ

от самоорганизации к искусственному интеллекту

Апрель – Июнь

№ 2 (55), 2025

Главный редактор Старцев В.В. (к.т.н., Институт системологии)

Зам. главного редактора Князева Е.Н. (д.филос.н., профессор НИУ ВШЭ)

Редакционный Совет

Боголепова И.Н. (академик РАН, д.мед.н., проф., зав.лаб. научного Центра неврологии РАМН, Москва, Россия); **Гершензон К.** (д.ф.-м.н. (PhDr), проф. Национального автономного университета города Мехико, Мексика); **Эрди П.** (д.ф.-м.н. (PhDr), Центр по исследованию сложных систем в Колледже Каламазу, штат Мичиган, США); **Игамбердиев А.У.** (д.б.н.(PhDr), проф. факультета биологии Университета Ньюфаундленда, Канада); **Майнцер К.** (д.филос.н.(PhDr), зав. каф. философии и теории науки Технического университета Мюнхена, президент Германского общества сложных систем и нелинейной динамики, Мюнхен, Германия); **Малинецкий Г.Г.** (д.ф.-м.н., проф., Институт прикладной математики (ИПМ) им. М. В. Келдыша РАН, Москва, Россия); **Панин В.Е.** (академик РАН, д.ф.-м.н., проф., Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия); **Поспелов И.Г.** (чл.-кор. РАН, д.ф.-м.н., проф., зав. отделом Вычислительного центра им. А.А. Дородницына РАН, Москва, Россия); **Хофкирхнер В.** (д.филос.н. (PhDr), президент Центра Берталанфи по изучению науки о системах, Вена, Австрия)

Редакционная коллегия

Голиченков В.А. (д.б.н., проф., МГУ, Москва, Россия); **Клиге Р.К.** (д.геогр.н., проф., МГУ, Москва, Россия); **Куркина Е.С.** (д.ф.-м.н., МГУ, Москва, Россия); **Магницкий Н.А.** (д.ф.-м.н., проф., МГУ, Москва, Россия); **Мелехова О.П.** (д.б.н., МГУ, Москва, Россия); **Орынбасаров А.С.** (к.т.н., НПО "Инновационные нанотехнологии Казахстана", Астана, Казахстан); **Ризниченко Г.Ю.** (д.ф.-м.н., проф., МГУ, Москва, Россия); **Сафьянов Г.А.** (д. геогр. н., проф., МГУ, Москва, Россия); **Суриков В.В.** (д.ф.-м.н., проф., МГУ, Москва, Россия); **Чуличков А.И.** (д.ф.-м.н., проф., МГУ, Москва, Россия); **Шанявский А.А.** (д.т.н., проф., ФАУ «Государственный центр «Безопасность полетов на воздушном транспорте», Москва, Россия), **Лада О.В.** (Институт системологии, Москва, Россия; выпускающий редактор)

УЧРЕДИТЕЛЬ: АО «Институт фундаментальных системных исследований»

Междисциплинарный научный журнал «СЛОЖНЫЕ СИСТЕМЫ» зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-73604 от 31.08.2018 г.

ISSN № 2220-8569

Сдано в набор 29.04.2025. Подписано в печать 04.06.2025. А4, бумага 80 гр. офсетная, печать 4+4 цветная. Обложка 250 гр, печать 4+0, глянцевая ламинация. КБС. Тираж 50 экз. Цена свободная.

Издательство: АО «Институт фундаментальных системных исследований»

Адрес редакции и издательства: 111402, Россия, Московская область, Лыткарино, Парковая.1

Тел./Факс: +7(495) 941-62-72 <http://thecomplexsystems.ru/>; e-mail: mail@systemology.ru

Подписной индекс **88852**

Компьютерная верстка издательства АО «Институт системологии»

Типография ООО РПК «ВАШ ФОРМАТ», Россия, 115419, г. Москва, Малая Калужская, 15, корпус 17

© «Сложные системы: от самоорганизации к искусственному интеллекту», 2025

© Коллектив авторов, 2025

Перепечатка и перевод статей – только со ссылкой на журнал

СОДЕРЖАНИЕ

Фундаментальные исследования

Иванченко А. Ф., Наумов А. В., Старцев В. В. Системный взгляд на закономерности развития рынка индия через призму циклических теорий	4
Брюсов И. И. Принцип дополнительности Н. Бора и его философское значение в XXI веке	13
Левонич Б. Н. Системный взгляд на состояние обеспечения материалами электронных производств в РФ. Часть 2	28

Новые идеи, подходы

Желтков М. А. Стратегический менеджмент: эволюция парадигмы в XXI веке	68
---	-----------

Дискуссионные аспекты

Шипулин А. В. О возможностях и ограничениях системного анализа рынка телекоммуникационных систем в России	79
--	-----------

CONTENTS

Fundamental research

- Ivanchenko A. F., Naumov A. V., Startsev V. V.** A systemic view on the development patterns of the indium market through the lens of cyclical theories 4
- Bryusov I. I. N.** Bohr's principle of complementarity and its philosophical significance in the 21st century 13
- Levonovich B. N.** Systemic view on the state of materials supply for electronic manufacturing in the Russian Federation. Part 2 28
-

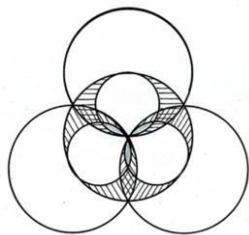
New ideas, approaches

- Zheltkov M. A.** Strategic management: evolution of the paradigm in the 21st century 68
-

Debatable aspects

- Shipulin A. V.** On the capabilities and limitations of system analysis of the telecommunications market in Russia 79

УДК 338.5:669.872



СИСТЕМНЫЙ ВЗГЛЯД НА ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ РЫНКА ИНДИЯ ЧЕРЕЗ ПРИЗМУ ЦИКЛИЧЕСКИХ ТЕОРИЙ

Иванченко А. Ф. (Первый заместитель генерального директора –
Главный экономист) АО «ОКБ «Астрон»

iaf@astrohn.ru

Наумов А. В. (руководитель направления) АО «ОКБ «Астрон»

naumov_arkadii@mail.ru

Старцев В. В. (к. т. н.) Институт системологии

Аннотация. В статье предпринята попытка комплексного анализа рынка индия – ключевого технологического металла, характеризующегося высокой стратегической значимостью и структурной неустойчивостью. На основе системного подхода исследуются фундаментальные характеристики рынка: особенности сырьевой базы как побочного продукта, концентрированная география производства, эволюция потребительских секторов и крайняя волатильность цен. Особое внимание уделено анализу влияния геополитических факторов (экспортные ограничения КНР 2025 г.) на сбои в глобальных цепях поставок. Динамика рынка интерпретируется через концепцию длинных сырьевых суперциклов, что позволяет выявить макроэкономические драйверы ценовых трендов. В заключение сформулированы ключевые вызовы и перспективы, связанные с технологическими ограничениями извлечения металла и ростом инновационного спроса.

Ключевые слова: индий, редкие и рассеянные металлы, рынок сырья, цепочки поставок, ценовая волатильность, сырьевой суперцикл, геополитические риски, Китай.

Введение

Фундаментом современной технологической цивилизации, основанной на микроэлектронике, цифровой связи и возобновляемой энергетике, является группа редких и рассеянных металлов. Среди них индий (In) занимает особое положение: будучи геохимически рассеянным элементом со средним содержанием в земной коре порядка 10^{-5} % [6], он стал незаменимым компонентом для целого спектра высокотехнологичных применений. Рынок индия представляет собой классический пример узкого, олигополистического рынка с ярко выраженной доминирующей ролью одного игрока – Китая, что формирует системные риски для глобальной производственно-технологической кооперации [3]. Целью данной работы является системный

анализ структурных особенностей и динамических закономерностей рынка индия с применением инструментария циклических теорий для оценки его перспектив и точек напряжения.

1. Структурные характеристики рынка: фундаментальные факторы неустойчивости

1.1. Сырьевая база и производственная архитектура

Индий практически не образует самостоятельных месторождений, извлекаясь исключительно как сопутствующий продукт при переработке цинковых и, в меньшей степени, свинцовых руд [1]. Эта зависимость предопределяет ключевые особенности рынка: неэластичность предложения, жесткую привязку объемов производства к конъюнктуре рынков основных металлов и высокую неопределенность в оценке запасов. Мировые запасы индия оцениваются приблизительно в 16 тыс. т, а объем производства первичного металла в 2024 году составил около 1080 т (рис. 1) [5, 8]. Значительную роль (свыше 30 %) играет вторичная переработка, выступая важным, но недостаточным стабилизирующим фактором (рис. 2).

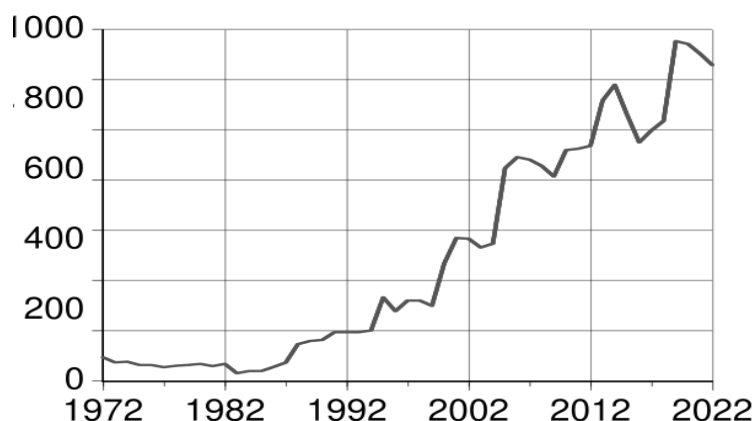


Рис. 1. Производство первичного индия в 1972–2022 гг., т/г Источник – ICA



Рис. 2. Динамика производства первичного и вторичного индия 2023–2025 гг. и прогноз на перспективу до 2033 г., млн долл. Источник – ICA

Добывающая и металлургическая инфраструктура исторически сложилась вокруг месторождений основных металлов. Технологическая цепочка извлечения индия включает обработку промежуточных продуктов (кеков, пылей, вельц-оксидов) серной кислотой с последующим выделением чернового металла методами цементации или экстракции [1].

Доминирование Китая в данном сегменте стало структурным фактором риска. На его долю сегодня приходится около 70 % мирового производства первичного индия (рис. 3), а внутренний рынок КНР оценивался в 2024 году в 285,7 млн долл. с прогнозируемым ростом до 387,2 млн долл. к 2030 году [3]. Введение Китаем в феврале 2025 года лицензионного режима экспорта индия и технологий его переработки [3] стало ярким проявлением использования ресурсного доминирования в геополитических целях, уже приведшим к снижению предсказуемости поставок и росту логистических издержек для глобальных потребителей.

1.2. Эволюция потребительских секторов

Структура потребления индия демонстрирует динамичную эволюцию от традиционных инженерных применений к высокотехнологичным отраслям. Исторически сложившиеся сектора – легкоплавкие припои (в том числе для вакуумной техники и многослойных микросхем), антикоррозионные покрытия и подшипниковые сплавы – остаются стабильными, но не определяющими нишами.

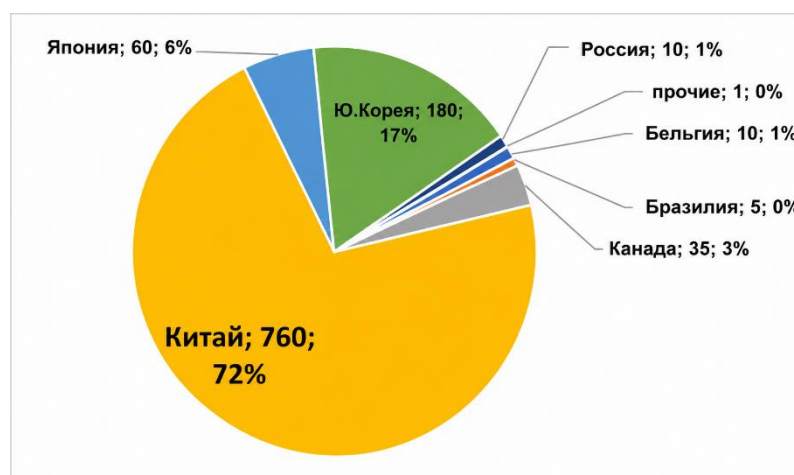


Рис. 3. Производители первичного индия в 2025 г., т

Источник – USGS

Безусловным лидером потребления на протяжении последних двух десятилетий является производство прозрачного проводящего оксида индия-олова (ИТО), на долю которого до сих пор приходится около 45 % мирового потребления (рис. 4) [3]. ИТО критически важен для изготовления дисплеев (LCD, OLED, PDP), сенсорных экранов и фотоэлектрических элементов. Однако относительная доля этого сектора постепенно снижается на фоне взрывного роста другого направления – полупроводниковой электроники и фотоники. Соединения индия (фосфид InP,

антимонид InSb) являются ключевыми материалами для волоконно-оптических линий связи, высокочастотных транзисторов, лазеров и датчиков инфракрасного излучения, формируя новый, высокомаржинальный драйвер долгосрочного спроса [1, 3].

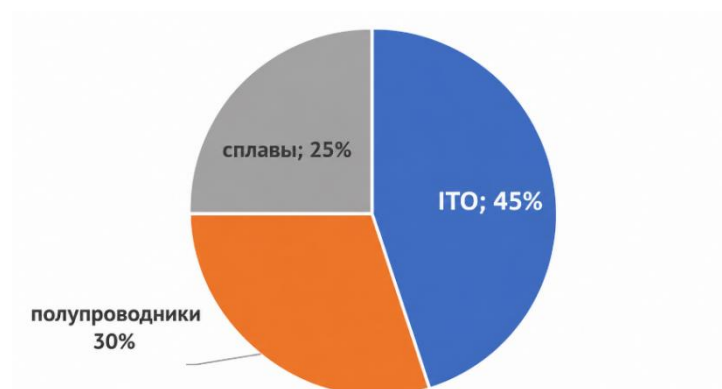


Рис. 4. Потребление индия в 2024 г. по областям применения, %
Источник – USGS

1.3. Ценовая динамика и факторы волатильности

Рынок индия характеризуется экстремальной ценовой волатильностью, что является следствием сочетания неэластичного предложения, концентрированной структуры производства и цикличности спроса со стороны высокотехнологичных отраслей. После исторических максимумов 2004–2006 годов (около 1000 долл./кг), спровоцированных бумом потребительской электроники, последовала резкая коррекция в период кризиса 2008 года. В последнее десятилетие цены стабилизировались в коридоре 350–400 долл./кг (рис. 5), что отражает текущий временный баланс спроса и предложения. Однако консенсус-прогнозы аналитиков, основанные на ожиданиях роста дефицита, указывают на высокую вероятность нового долгосрочного восходящего тренда (рис. 6) [3].

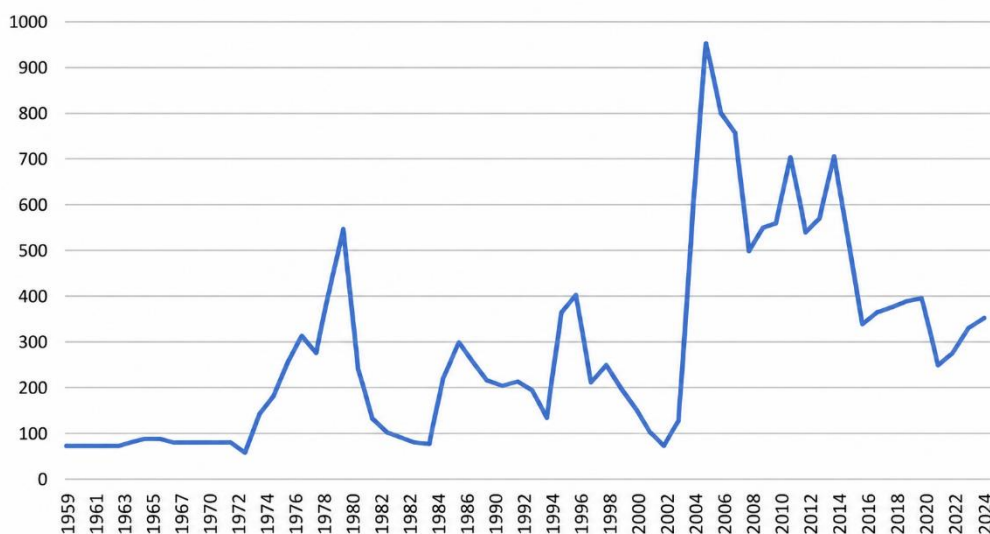


Рис. 5. Изменение цены на индий 1959–2024 гг., долл./кг
Источник – metal-pages

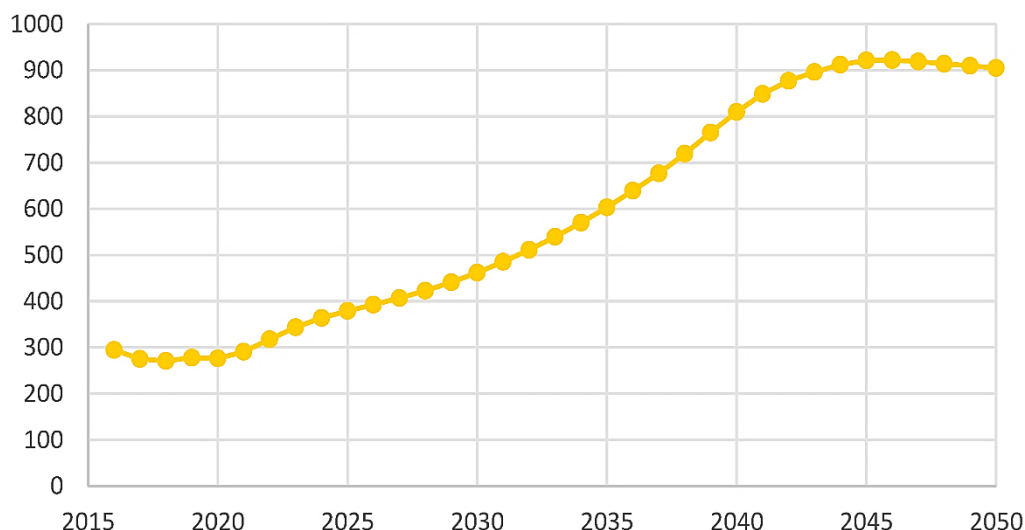


Рис. 6. Долгосрочной прогноз цен на индий, долл/кг

Источник – AIM Specialty Material)

2. Циклические закономерности: интерпретация динамики через теорию суперциклов

Динамика сырьевых рынков, особенно в периоды турбулентности, часто анализируется через призму долгосрочных циклических моделей. Концепция тридцатилетнего сырьевого суперцикла, развитая Джеффри Кеннеди на основе волновой теории Р. Эллиотта [7, 8], предлагает макроэкономическое объяснение продолжительных периодов роста и падения цен на сырьевые товары. Согласно этой модели, фаза роста цен, длящаяся около 10 лет, сменяется двадцатилетней фазой коррекции и стагнации [2, 4]. Предполагается, что последний глобальный суперцикл был инициирован в начале 2000-х годов масштабной индустриализацией Китая и экономик стран БРИКС, создавшей мощный импульс спроса на широкий спектр промышленных сырьевых товаров [2, 4].

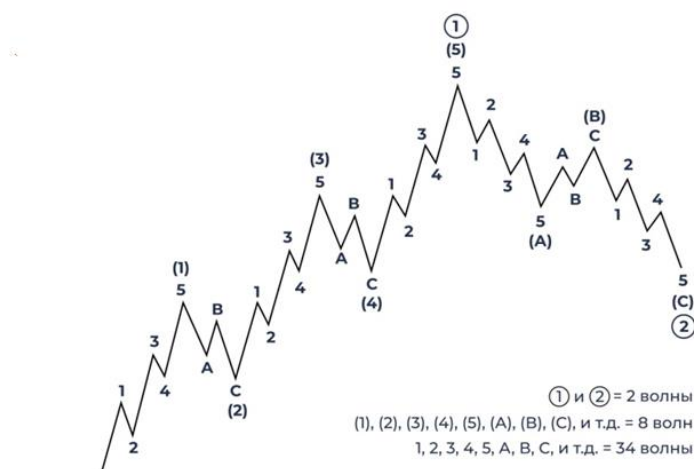


Рис. 7. Цикл Эллиота

Применение данной модели к узкому рынку технологического металла, такого как индий, имеет определенные ограничения, поскольку его динамика сильнее зависит от волн технологических инноваций, чем от общей макроэкономической конъюнктуры. Тем не менее, наблюдается очевидная корреляция между периодами ценовых пиков индия (например, середины 2000-х) и восходящей фазой последнего сырьевого суперцикла. Это указывает на чувствительность рынка к глобальным макроэкономическим импульсам, которые накладываются на его внутренние, технологически обусловленные циклы спроса. Таким образом, динамика рынка индия может рассматриваться как результат интерференции длинных сырьевых волн и более коротких, но мощных волн технологического внедрения (например, массового перехода на ЖК-телевизоры, а в будущем – на технологии 5G и квантовой фотоники).

3. Перспективы и стратегические вызовы: между дефицитом и технологическим прорывом

Ключевым вызовом для устойчивого развития рынка является фундаментальное технологическое ограничение: сквозное извлечение индия из рудного сырья не превышает 50 % [1, 3]. Значительная часть металла безвозвратно теряется в «хвостах» обогащения и технологических отвалах. Решение этой проблемы лежит в плоскости интенсификации НИОКР в области гидрометаллургии, направленных на создание высокоселективных и экономичных методов извлечения (экстракционных, сорбционных, ионообменных) для работы с растворами сверхнизких концентраций [1].

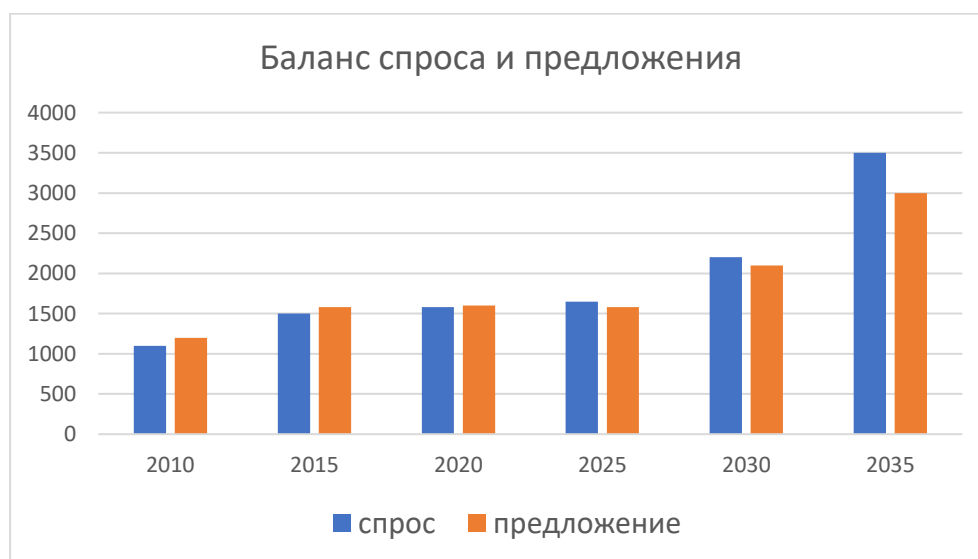


Рис. 8. Баланс «спроса-предложения» на рынке индия (источник – расчеты авторов)

Прогноз баланса спроса и предложения (рис. 8) указывает на высокую вероятность формирования структурного дефицита уже в среднесрочной перспективе (к 2035 году). Основными драйверами спроса выступят полупроводниковая отрасль и фотоника, в то время как

предложение будет ограничено темпами модернизации металлургических мощностей и успехами в области рециклинга. Геополитическая нестабильность, проявляющаяся в экспортных ограничениях, будет усугублять волатильность, вынуждая потребительские страны к стратегическим ответам: диверсификации источников снабжения (включая развитие собственных мощностей, например, в России), ускорению программ рециклинга и поиску материалов-заменителей (технологической субституции).

Заключение

Рынок индия представляет собой сложную, высококонцентрированную и волатильную систему, динамика которой определяется взаимодействием трех групп факторов:

1. *Геолого-технологических*, обусловленных побочным характером производства и низкой степенью извлечения.
2. *Геополитических и регуляторных*, связанных с доминированием Китая и использованием экспортных ограничений как инструмента торговой политики.
3. *Технологически-циклических*, где долгосрочные макроэкономические суперциклы накладываются на более короткие, но мощные волны спроса от новых технологических инноваций.

Управление рисками в таких условиях требует от участников рынка и государственных органов комплексной стратегии, включающей долгосрочные инвестиции в геологоразведку и металлургические НИОКР, создание стратегических запасов, развитие замкнутых циклов рециклинга и политику диверсификации цепочек поставок. Будущая траектория развития рынка будет в меньшей степени определяться абстрактными сырьевыми циклами и в большей – скоростью технологической трансформации в ключевых потребительских отраслях и способностью добывающе-перерабатывающего комплекса адекватно и своевременно на нее ответить.

Литература

1. Наумов А.В. Цикличность рынков некоторых редких рассеянных металлов. Перспективы рынков галлия, индия, селена, теллура // Труды II Международной конференции «Российский рынок цветных металлов: прогноз 2006–2007». М., 2006. С. 28–32.
2. Растяникова Е.В. Суперциклы на рынке сырьевых ресурсов на примере стран БРИКС // Научные доклады ИВ РАН. URL: https://lk.ivran.ru/media/Суперциклы_на_рынке.pdf
3. Данные отчетов и прогнозов USGS, ICA, Metal Pages, AIM Specialty Materials (2024–2025 гг.).

4. Cuddington J.T., Jerrett D. Super Cycles in Real Metals Prices? // IMF Working Paper. 2008.
5. Elliott R.N. The Wave Principle. 1938.
6. Gallium, germanium and indium. Ch. In United States Mineral Resources, Professional Paper 820, p. 906.
7. Kennedy J. The Elliott Wave Trading System for Commodities. 2020.
8. Kennedy, Jeffrey. Elliott Wave Trading: Principles and Trading Strategies [Электронный ресурс]. URL: <http://www.elliottwave.com/en/Video/Elliott-Wave-Trading-Principles-and-Trading-Strategies>

A SYSTEMIC VIEW ON THE DEVELOPMENT PATTERNS OF THE INDIUM MARKET THROUGH THE LENS OF CYCLICAL THEORIES

Ivanchenko A. F. (First Deputy General Director – Chief Economist)

JSC OKB “Astron” *iaf@astrohn.ru*

Naumov A. V. (Head of Department) JSC OKB “Astron” *naumov_arkadii@mail.ru*

Startsev V. V. (Ph.D.) Institute of Systemology

Abstract. The article attempts a comprehensive analysis of the indium market – a key technological metal characterised by high strategic importance and structural instability. Using a systemic approach, the study examines the market’s fundamental characteristics: the specifics of the raw material base as a by product, concentrated production geography, the evolution of consumer sectors, and extreme price volatility. Particular attention is given to analysing the impact of geopolitical factors (China’s 2025 export restrictions) on disruptions in global supply chains. Market dynamics are interpreted through the concept of long commodity supercycles, which helps identify macroeconomic drivers of price trends. In conclusion, the authors outline key challenges and prospects related to technological limitations in metal extraction and the growing innovative demand.

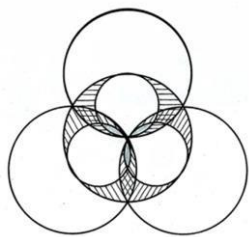
Keywords: indium, rare and dispersed metals, raw materials market, supply chains, price volatility, commodity supercycle, geopolitical risks, China.

References

1. Naumov A.V. Cyclicity of markets for certain rare dispersed metals. Prospects for gallium, indium, selenium, and tellurium markets // Proceedings of the 2nd International Conference “The Russian Non-Ferrous Metals Market: Forecast for 2006–2007”. Moscow, 2006. P. 28–32.
2. Rastyannikova E.V. Supercycles in the commodity resources market: The case of BRICS countries // Scientific Reports of the Institute of Oriental Studies, Russian Academy of Sciences. URL: https://lk.ivran.ru/media/Суперциклы_на_рынке.pdf

3. Data from reports and forecasts by USGS, ICA, Metal Pages, AIM Specialty Materials (2024–2025)
4. Cuddington J.T., Jerrett D. Super Cycles in Real Metals Prices? // IMF Working Paper. 2008.
5. Elliott R.N. The Wave Principle. 1938.
6. Gallium, germanium and indium. Chapter in United States Mineral Resources, Professional Paper 820, p. 906.
7. Kennedy J. The Elliott Wave Trading System for Commodities. 2020.
8. Kennedy, Jeffrey. Elliott Wave Trading: Principles and Trading Strategies [Electronic resource]. URL: <http://www.elliottwave.com/en/Video/Elliott-Wave-Trading-Principles-and-Trading-Strategies>

УДК 165.0:530.145



ПРИНЦИП ДОПОЛНИТЕЛЬНОСТИ Н. БОРА И ЕГО ФИЛОСОФСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ В XXI ВЕКЕ

Брюсов И. И. (независимый исследователь)

Аннотация. Статья посвящена анализу принципа дополнительности Нильса Бора, его исторических корней, философского значения и применения в XXI веке. Рассматриваются историко-научные предпосылки возникновения принципа, его эпистемологические и онтологические интерпретации, а также современные области применения, включая философию науки, квантовую биологию, квантовую теорию, искусственный интеллект и этические дилеммы, связанные с технологиями. Особое внимание уделено реляционным интерпретациям квантовой механики, проблеме объяснимости ИИ, а также новым вызовам, связанным с квантовыми технологиями и глобальными экологическими проблемами в 2024–2025 годах. На основе анализа показано, что принцип дополнительности сохраняет и усиливает свою эвристическую, методологическую и этическую значимость в условиях роста сложности научного знания и междисциплинарного взаимодействия. Дополняются выводы о роли принципа в формировании новых парадигм мышления, связанных с неопределенностью и системной взаимосвязанностью.

Ключевые слова: Нильс Бор, принцип дополнительности, квантовая механика, философия науки, искусственный интеллект, реляционная квантовая механика, эпистемология, объяснимость, квантовая биология, этика технологий, квантовые технологии, междисциплинарность.

Введение

Всякое истинно глубокое явление природы, например «жизнь», «атомный объект», «физическая система», не может быть определено однозначно с помощью слов нашего языка и требует для своего определения по крайней мере два взаимоисключающих дополнительных понятия. Принцип дополнительности, предложенный Нильсом Бором в 1927 году на Международном физическом конгрессе в Копенгагене, стал одной из основополагающих идей квантовой механики. Он был сформулирован как способ разрешения фундаментального противоречия между волновыми и корпускулярными свойствами микрочастиц, утверждая, что для полного описания квантовых объектов необходимы взаимодополняющие, но взаимоисключающие экспериментальные подходы. Этот принцип стал не просто техническим инструментом, но и философской основой, переосмысливающей природу знания и реальности [1].

Со временем значение принципа вышло далеко за пределы физики. Он стал рассматриваться как универсальный эпистемологический и методологический подход,

Принцип дополнительности Н. Бора...

применимый к различным областям знания. В XXI веке, особенно в 2024–2025 годах, в условиях стремительного развития цифровых технологий, искусственного интеллекта, квантовых вычислений, биотехнологий и глобальных вызовов, таких как изменение климата, дополнительность приобретает новое звучание. Она становится инструментом для осмысления сложных систем, где линейные и однозначные объяснения оказываются недостаточными [11; 5].

Принцип дополнительности помогает не только в научных исследованиях, но и в решении социальных и этических дилемм. Например, в области ИИ он позволяет балансировать между технологической эффективностью и необходимостью этической ответственности. В контексте квантовых технологий, таких как квантовое шифрование и квантовые вычисления, он помогает понять, как сочетать различные подходы к безопасности данных и их интерпретации. Таким образом, дополнительность сегодня – это не только научный принцип, но и способ мышления, который позволяет справляться с неопределенностью и многослойностью современной реальности [14]. В этой статье мы подробно разберем, как развивается этот принцип, какие новые интерпретации он получает и как применяется в самых актуальных областях науки и технологий.

Историко-научный контекст

В начале XX века в физике появились признаки новых революционных изменений, сопоставимых по масштабу со сменой ньютоновской картины мира релятивистской картиной Максвелла-Эйнштейна. Первыми симптомами назревающих событий стали парадоксы, обнаруженные в сфере применения теории электромагнитного поля к атомному миру.

Опыты Резерфорда и его сотрудников показали, что атом состоит из массивного ядра и легкой протяженной оболочки. Возникла мысль, что атом можно рассматривать как подобие миниатюрной солнечной системы. По теории Резерфорда, каждый электрон вращается вокруг ядра, причем сила притяжения ядра уравнивается центробежной силой, возникающей при вращении электрона. Вращение электрона должно вызывать испускание электромагнитных волн. Однако, излучая свет, электрон теряет часть своей энергии, вследствие чего нарушается равновесие; электрон должен постепенно передвигаться ближе к ядру, а частота излучения – непрерывно меняться. В конце концов электрон должен «упасть» на ядро, что означало бы разрушение атома. Таким образом, применение принципов классической физики привело к неустранимому парадоксу: атом не мог быть устойчивым, хотя вся совокупность данных свидетельствовала об обратном.

Первая попытка построить качественно новую – квантовую – теорию атома была предпринята в 1913 г. Нильсом Бором. Он поставил цель связать в единое целое эмпирические закономерности линейчатых спектров, ядерную модель атома Резерфорда и квантовый характер излучения и поглощения света. Постулаты Бора (стационарные состояния и правило частот)

позволили объяснить спектр водорода, но вступали в противоречие с классической электродинамикой. Как позднее подчеркивал Вернер Гейзенберг, эта ситуация отражала фундаментальный разрыв с классической традицией, требующий нового понимания физической реальности [7].

Следующим шагом стала гипотеза Луи де Бройля (1923 г.) об универсальности корпускулярно–волнового дуализма: с каждой микрочастицей связываются как корпускулярные характеристики (энергия E , импульс p), так и волновые (частота ν , длина волны λ). Формулы $E = h\nu$ и $p = h/\lambda$, постулированные для фотонов, были распространены на все микрообъекты. Гипотеза де Бройля получила блестящее экспериментальное подтверждение в опытах Дэвиссона и Джермера (1927 г.) по дифракции электронов, что окончательно утвердило представление о двойственной природе материи.

Возникновение принципа дополнительности, таким образом, тесно связано с кризисом классической физики. Эксперименты, такие как фотоэффект, открытый Альбертом Эйнштейном, и интерференция электронов, показали, что микромир не подчиняется законам классической механики и электродинамики. Эти явления требовали нового способа описания реальности, который не укладывался в традиционные категории пространства, времени и причинности. Именно в этом контексте Нильс Бор предложил свой принцип дополнительности, утверждая, что различные экспериментальные условия выявляют разные аспекты одной и той же реальности, которые не могут быть объединены в единую непротиворечивую картину без учета контекста наблюдения [1].

Важным элементом боровской философии стало признание активной роли наблюдателя и измерительного прибора в процессе получения знания. Результат эксперимента зависит от выбранной экспериментальной установки, а значит, знание носит глубоко контекстуальный характер. Уже тогда Бор подчеркивал, что объективность в квантовой механике не может быть абсолютной, как в классической физике, а должна учитывать влияние средств наблюдения на объект. Как отмечает А. Плотницкий, дополнительность у Бора представляет собой не просто физический принцип, а радикальную антиэпистемологическую стратегию, ставящую под сомнение возможность полного описания реальности безотносительно к средствам познания [10].

В 2024–2025 годах историки науки и философы продолжают переосмысливать вклад Бора. Новые архивные исследования и реконструкции его переписки с Вернером Гейзенбергом показывают, что Бор изначально видел дополнительность не только как физический принцип, но и как способ осмысления границ человеческого знания в целом. Современные эксперименты, такие как проверки неравенств Белла с использованием запутанных частиц на квантовых компьютерах (например, эксперименты Google Quantum AI в 2023 г.), подтверждают идеи Бора о

Принцип дополнительности Н. Бора...

фундаментальной контекстуальности квантовых измерений. Эти исследования показывают, что принцип дополнительности не утратил своей актуальности, а, наоборот, стал основой для понимания новых квантовых технологий [12].

Эпистемологическое значение

Принцип дополнительности фундаментально меняет классическое понимание объективности, которое предполагало, что знание о мире может быть независимым от средств и условий его получения. В квантовой механике наблюдение становится активным процессом, напрямую влияющим на объект исследования. Это означает, что истина в квантовом мире не является абсолютной, а всегда связана с конкретным контекстом эксперимента. Этот вывод Нильса Бора стал революционным не только для физики, но и для философии науки в целом, поскольку он поставил под вопрос саму возможность универсального, независимого знания [1; 7].

В современной философии науки эта идея продолжает развиваться через конструктивистские и инструменталистские подходы. Знание рассматривается как результат сложного взаимодействия субъекта (исследователя), инструментов (технологий и методологий) и объекта (изучаемого явления). Эти взгляды находят отражение в различных областях – от когнитивных наук, изучающих восприятие и мышление, до теории информации, которая исследует передачу и обработку данных [5].

В 2024–2025 годах эпистемологическое значение дополнительности усиливается в контексте таких новых направлений, как философия больших данных и эпистемология машинного обучения. Например, в области больших данных исследователи сталкиваются с необходимостью сочетать количественные и качественные методы анализа, что напрямую перекликается с идеей дополнительности: разные подходы выявляют разные аспекты одной и той же реальности (например, статистические корреляции и культурные контексты). В философии ИИ активно обсуждается проблема «черных ящиков» – алгоритмов, чьи решения сложно интерпретировать. Здесь дополнительность проявляется как баланс между точностью предсказаний и необходимостью объяснимости, что требует от эпистемологии новых инструментов для анализа природы знания, создаваемого машинами [9; 6].

Кроме того, в 2024–2025 годах активно развивается направление под названием «эпистемология неопределенности», которое, опираясь на идеи Бора, исследует, как наука может работать с принципиально неполной информацией. Это особенно актуально для климатических моделей и прогнозов пандемий, где множественность подходов и признание ограничений каждого из них становятся необходимыми для принятия решений [3]. Таким образом, принцип

дополнительности становится не просто частью эпистемологии физики, но и универсальной рамкой для понимания природы знания в эпоху сложных систем и глобальных вызовов.

Онтологические интерпретации

Онтологический статус принципа дополнительности остается предметом оживленных дискуссий среди философов и физиков. Существует несколько подходов к его интерпретации. Первый – инструменталистский – рассматривает дополнительность как удобный метод описания экспериментальных данных, не делая при этом никаких заявлений о природе самой реальности. Второй – реалистический – интерпретирует дополнительность как указание на фундаментальную двойственность природы, где волновые и корпускулярные свойства являются двумя сторонами одной и той же сущности. Третий – реляционный подход – утверждает, что свойства объектов не являются абсолютными, а возникают только в контексте взаимодействий с другими системами [4; 8].

Современные тенденции в философии физики, особенно в 2024–2025 годах, все чаще склоняются к реляционному пониманию. Этот подход, во многом вдохновленный работами Карло Ровелли, подчеркивает, что реальность в квантовой механике не состоит из независимых объектов с фиксированными свойствами, а представляет собой сеть отношений, где каждый элемент определяется через свои связи с другими [11]. В этом контексте дополнительность становится не просто эпистемологическим ограничением (то есть ограничением нашего знания), а фундаментальной характеристикой самой реальности: разные описания объекта отражают разные типы взаимодействий, в которых он участвует.

В 2024–2025 годах реляционное понимание получает новые подтверждения благодаря экспериментам в области квантовой информации. Например, исследования квантовой запутанности на установках типа IBM Quantum и Google Quantum AI показывают, что свойства частиц действительно зависят от контекста измерений, что подтверждает идеи реляционной квантовой механики. Более того, работы по квантовому дарвинизму, развиваемые Войцехом Зуреком и его командой, демонстрируют, как классическая реальность «возникает» из квантовой через взаимодействия и декогеренцию, что также укладывается в рамки реляционного подхода [15].

Кроме того, в 2024 году появилась серия статей в журналах *Nature Physics* и *Physical Review Letters*, посвященных так называемой «квантовой контекстуальности», где экспериментально доказывается, что результаты измерений зависят от порядка и типа проводимых экспериментов. Эти данные ставят под вопрос традиционные реалистические интерпретации и усиливают позиции реляционного подхода, делая принцип дополнительности

Принцип дополнительности Н. Бора...

онтологически значимым [12]. Таким образом, в XXI веке дополнительность становится не просто инструментом для описания, но и ключом к переосмыслению самой природы реальности.

Философские импликации

Принцип дополнительности Н. Бора оказывает глубокое влияние на философию XXI века, способствуя переходу от традиционных бинарных оппозиций (например, субъект–объект, волна–частица) к более сложным, многомерным моделям реальности. Он утверждает несколько ключевых идей, которые остаются актуальными в условиях современной науки и общества:

- *Множественность описаний.* Реальность не может быть исчерпывающе описана с помощью единственного подхода или теории. Разные методы и перспективы открывают разные аспекты одного и того же явления, которые дополняют друг друга. Например, в квантовой механике одно и то же явление может быть описано как волна или частица в зависимости от экспериментальной установки [1].
- *Контекстуальность истины.* Истина всегда зависит от условий, в которых она формулируется. Это особенно важно в эпоху информационного переизбытка, когда разные источники могут представлять одну и ту же проблему с совершенно разных точек зрения – научной, социальной или культурной.
- *Ограниченность любой отдельной перспективы.* Ни одна теория, метод или дисциплина не могут претендовать на абсолютное знание. Это подчеркивает необходимость диалога и сотрудничества между разными формами знания, будь то академическая наука, традиционные знания или общественные инициативы [2; 8].

В 2024–2025 годах эти философские импликации приобретают новое звучание в контексте глобальных вызовов, таких как изменение климата, технологические революции и социальная поляризация. Принцип дополнительности становится основой для осмысления сложных систем, где однозначные решения невозможны. Например, в дебатах о будущем искусственного интеллекта или генной инженерии необходим диалог между техническими экспертами, этиками, политиками и общественностью. Каждая из этих групп привносит свою перспективу, и ни одна из них не может претендовать на полное понимание последствий этих технологий [6; 13]. Дополнительность здесь выступает как философская рамка, которая позволяет признать ценность каждой точки зрения и искать баланс между ними.

Кроме того, в эпоху цифровой глобализации дополнительность помогает переосмыслить проблему «постправды» и информационных войн. В условиях, когда социальные сети и алгоритмы формируют персонализированные представления о реальности, истина становится все более контекстуальной. Исследования 2024 года, проведенные в рамках программ по цифровой этике в Европейском союзе, показывают, что для борьбы с дезинформацией необходимо сочетать

технологические решения (например, проверку фактов с помощью ИИ) с гуманитарными подходами (например, развитием медиаграмотности). Это еще один пример того, как принцип дополнительности может быть применен к современным социальным проблемам, подчеркивая необходимость множественности подходов для решения сложных вопросов [13].

Еще одним философским следствием дополнительности является переосмысление этической ответственности в науке и технологиях. В 2024–2025 годах, с ростом влияния квантовых технологий (например, квантового шифрования) и биотехнологий (например, редактирования генома CRISPR), возникает необходимость учитывать не только научные достижения, но и их потенциальные социальные и экологические последствия. Дополнительность здесь проявляется как необходимость сочетания прогресса и осторожности, свободы исследований и этических ограничений. Например, в обновленных руководствах по этике технологий, опубликованных ЮНЕСКО в 2024 году, подчеркивается важность такого баланса, что перекликается с идеей Бора о том, что разные аспекты реальности требуют разных способов описания и осмысления [13].

Наконец, принцип дополнительности способствует развитию нового философского подхода, который можно назвать «философией взаимосвязанности». В условиях глобализации и экологических кризисов все чаще звучат идеи о том, что все явления – от квантовых частиц до экосистем и социальных структур – связаны между собой. Исследования в области системной философии, опубликованные в журналах вроде *Philosophy of Science* в 2024 году, показывают, что дополнительность может стать основой для понимания этой взаимосвязанности, поскольку она подчеркивает важность отношений и контекста в любом описании реальности [11; 8]. Это особенно актуально для решения транснациональных проблем, таких как изменение климата, где наука, политика и культура должны взаимодействовать, дополняя друг друга [3].

Дополнительность и квантовые технологии

Квантовые технологии, такие как квантовые вычисления, квантовое шифрование и квантовые сенсоры, становятся одной из ключевых областей развития в 2024–2025 годах. Принцип дополнительности играет важную роль в осмыслении их возможностей и ограничений. Например, в квантовых вычислениях дополнительность проявляется в необходимости сочетания разных подходов к обработке информации – квантовых и классических. Квантовые компьютеры превосходят классические в определенных задачах (например, факторизации больших чисел), но для большинства практических приложений требуют интеграции с классическими алгоритмами. Эта гибридность отражает боровскую идею о том, что полное описание сложного явления требует взаимодополняющих методов [4; 12].

Принцип дополнительности Н. Бора...

Кроме того, в области квантового шифрования (например, протоколов квантового распределения ключей) дополнительность помогает понять фундаментальные ограничения безопасности. Протоколы, основанные на квантовой запутанности, обеспечивают теоретически абсолютную защиту, но их реализация на практике сталкивается с техническими ограничениями, такими как декогеренция. Здесь дополнительность проявляется как баланс между теоретическими идеалами и практическими возможностями [15]. В 2024–2025 годах крупные технологические компании (Google, IBM, Microsoft) и государственные инициативы (например, Национальная квантовая инициатива США) продолжают инвестировать в квантовые технологии, и принцип дополнительности становится методологической основой для их развития. Исследования, опубликованные в журналах вроде *Nature Quantum Technology*, подчеркивают важность сочетания разных подходов для достижения устойчивого прогресса.

Дополнительность и глобальные экологические вызовы

Глобальные экологические вызовы, такие как изменение климата, утрата биоразнообразия и загрязнение, требуют комплексного подхода, который идеально соотносится с принципом дополнительности. В 2024–2025 годах, на фоне новых докладов IPCC и инициатив в рамках Парижского соглашения, становится очевидным, что для решения этих проблем необходимы разные уровни анализа и действия – от физических моделей климата до социальных и экономических стратегий.

Например, при моделировании климатических изменений ученые используют множество подходов, каждый из которых описывает лишь часть реальности (атмосферные процессы, океанические течения, человеческая деятельность). Принцип дополнительности позволяет признать ограничения каждого подхода и использовать их в совокупности для более точных прогнозов [3]. Кроме того, в экологической политике дополнительность проявляется как необходимость сочетания глобальных усилий (например, международных соглашений) с локальными инициативами (например, проектами по устойчивому развитию на уровне общин). Исследования 2024 года, проведенные в рамках программы Horizon Europe, показывают, что такой подход улучшает эффективность экологических проектов, особенно когда в них включаются традиционные знания коренных народов, которые дополняют научные данные [13]. Таким образом, принцип дополнительности становится не только научным, но и социальным инструментом для борьбы с экологическими угрозами.

Дополнительность и искусственный интеллект

В области искусственного интеллекта (ИИ) принцип дополнительности Н. Бора проявляется в нескольких ключевых напряжениях, которые становятся особенно актуальными в XXI веке. Одно из центральных противоречий – это конфликт между предсказательной

точностью сложных моделей, таких как глубокие нейронные сети, и их интерпретируемостью, то есть способностью человека понять, как и почему алгоритм принимает те или иные решения. Современные системы ИИ, такие как модели глубокого обучения, обеспечивают высочайшую точность в задачах распознавания изображений, обработки текста или прогнозирования, но зачастую остаются «черными ящиками», непрозрачными даже для их создателей. В то же время более простые, интерпретируемые модели (например, линейные регрессии или деревья решений) часто уступают в точности. Это противоречие можно рассматривать как форму дополненности: обе характеристики – точность и интерпретируемость – необходимы для полного понимания и применения ИИ, но они не сводимы друг к другу и требуют разных подходов [9; 6].

В 2024–2025 годах эта проблема становится еще более острой в связи с развитием генеративного ИИ, такого как модели для создания текста, изображений и видео (например, улучшенные версии GPT или DALL-E). Эти системы достигают беспрецедентного уровня креативности и эффективности, но их решения практически невозможно объяснить в терминах человеческих категорий. Например, исследование, опубликованное в журнале *AI Ethics* в 2024 году, показало, что около 70% разработчиков сталкиваются с этическими дилеммами, связанными с использованием непрозрачных моделей в критически важных областях, таких как медицина или юриспруденция [6]. Здесь принцип дополненности проявляется как необходимость балансировать между технологической мощностью и ответственностью перед обществом.

Еще одна форма дополненности в ИИ связана с различием между корреляционным и причинным знанием. Современное машинное обучение в основном опирается на выявление статистических корреляций в больших объемах данных, но не способно устанавливать причинно–следственные связи, которые являются основой научного объяснения. Например, алгоритм может точно предсказать рост заболеваемости на основе погодных данных, но не объяснит, почему это происходит. Научное знание, напротив, стремится к причинным моделям, но часто сталкивается с нехваткой данных или сложностью систем. Эти два подхода – корреляционный и причинный – дополняют друг друга, но не могут быть полностью объединены в одну универсальную модель [5; 9].

В 2024–2025 годах этот аспект дополненности становится предметом активных исследований в области причинного ИИ (Causal AI). Такие работы, как публикации Джуды Перла и его коллег, показывают, что для создания более надежных систем ИИ необходимо интегрировать причинное моделирование с традиционным машинным обучением. Однако эта интеграция требует признания дополненности: корреляционные модели хороши для

Принцип дополнительности Н. Бора...

предсказаний, а причинные – для объяснений, и использование одного подхода не исключает ценности другого.

Кроме того, принцип дополнительности приобретает этическое измерение в контексте ИИ. В 2024–2025 годах глобальные инициативы, такие как обновленные руководства ЮНЕСКО по этике ИИ, подчеркивают необходимость сочетания технологического прогресса с защитой прав человека. С одной стороны, ИИ должен быть максимально эффективным, чтобы решать глобальные проблемы (например, в здравоохранении или экологии), а с другой – прозрачным и подотчетным, чтобы избежать дискриминации или нарушения приватности. Это напряжение между эффективностью и этикой можно рассматривать как еще одну форму дополнительности, где оба аспекта необходимы, но требуют разных методологий и инструментов [13].

Наконец, в рамках explainable AI (XAI, объяснимый ИИ) продолжают развиваться гибридные модели, которые пытаются согласовать точность и интерпретируемость. Например, в 2024 году DARPA (Агентство перспективных оборонных исследовательских проектов США) опубликовало отчет о новых алгоритмах, которые используют ансамбли методов для достижения баланса между этими характеристиками. Принцип дополнительности здесь выступает как методологическая рамка, позволяющая сочетать различные формы знания без их принудительной редукции к единому подходу.

Реляционные интерпретации квантовой механики

Реляционная квантовая механика (РКМ), предложенная Карло Ровелли, представляет собой радикальное переосмысление онтологии квантовой теории. Этот подход утверждает, что физические свойства объектов не являются абсолютными и внутренне присущими, а возникают только в контексте взаимодействий с другими системами. Основные положения РКМ можно сформулировать следующим образом:

- Свойства системы всегда относительны и зависят от взаимодействий с другими системами. Например, спин частицы не имеет фиксированного значения до тех пор, пока не измеряется в отношении другой системы или прибора.
- Не существует привилегированной точки зрения или «абсолютного наблюдателя», который мог бы описать реальность «как есть». Это означает, что любое описание реальности всегда контекстуально и зависит от точки отсчета.
- Фундаментальными являются не объекты как таковые, а отношения между ними. Объекты в этом смысле – это лишь узлы в сети взаимодействий [11].

В этом контексте принцип дополнительности Н. Бора получает глубокое онтологическое обоснование: различные описания одного и того же объекта (например, как волны или частицы) отражают не просто ограничения нашего знания или методов измерения, а реальную

множественность отношений, в которых этот объект участвует. Дополнительность, таким образом, перестает быть только эпистемологическим принципом (то есть связанным с тем, что мы можем знать) и становится характеристикой самой природы реальности.

В 2024–2025 годах реляционная интерпретация продолжает активно развиваться и получать экспериментальное подтверждение. Например, исследования в области квантовой запутанности и квантовой корреляции, проводимые на платформах квантовых компьютеров, таких как IBM Quantum и Google's Sycamore, демонстрируют, что свойства частиц действительно зависят от контекста измерения. В частности, эксперименты, опубликованные в журналах вроде *Nature Quantum Information* в 2024 году, показывают, как запутанные состояния могут быть описаны только через отношения между системами, а не через их индивидуальные характеристики [12]. Это подтверждает идею Ровелли о том, что реальность – это сеть взаимодействий.

Кроме того, реляционная интерпретация стала основой для развития новых теоретических подходов, таких как квантовая теория графов, которая моделирует физическую реальность как граф отношений. В 2024 году группа исследователей из Оксфордского университета предложила использовать этот подход для объяснения явлений квантовой гравитации, что напрямую связывает РКМ с попытками объединить квантовую механику и общую теорию относительности.

Еще одно важное направление, связанное с РКМ, – это применение принципа дополнительности в квантовой биологии. В 2024–2025 годах ряд исследований, опубликованных в журналах вроде *PNAS* (Proceedings of the National Academy of Sciences), фокусируется на квантовых эффектах в биологических процессах, таких как фотосинтез и навигация птиц. Здесь дополнительность проявляется в необходимости сочетания классических и квантовых описаний для объяснения одного и того же явления, что идеально укладывается в реляционную парадигму: свойства системы зависят от того, как и в каком контексте мы их исследуем [14].

Дополнительность и постнеклассическая наука

В концепции постнеклассической науки, разработанной В. С. Стёпиным, подчеркивается роль субъекта, ценностей и целей в научном познании [2]. Принцип дополнительности становится одним из ее оснований, позволяя учитывать множественность описаний сложных систем. Постнеклассическая наука характеризуется тем, что объектами исследования становятся сложные саморазвивающиеся системы, включающие человека как компонент, что делает ценностные и целевые установки неотъемлемой частью научной деятельности. Дополнительность здесь проявляется в том, что разные уровни описания (например, физический, биологический, социальный) не редуцируются друг к другу, но необходимы для целостного понимания.

Принцип дополнительности находит применение в различных областях:

Принцип дополнительности Н. Бора...

- в биологии (генетика и эпигенетика: наследственная информация может описываться как на уровне последовательности ДНК, так и на уровне эпигенетических модификаций, которые дополняют друг друга);
- в социальных науках (количественные и качественные методы дают различные, но взаимодополняющие картины социальных процессов);
- в климатологии (различные модели неопределенности и подходы к прогнозированию требуют объединения для принятия решений) [3].

Постнеклассическая наука также предполагает междисциплинарность и включение этических экспертиз в структуру научного исследования, что перекликается с боровской идеей о необходимости учитывать контекст и средства наблюдения.

Заключение

Принцип дополнительности, сформулированный Нильсом Бором почти столетие назад, сохраняет и усиливает свою актуальность в XXI веке как универсальный методологический и философский принцип. Его первоначальная роль в квантовой механике – объяснение взаимодополняющих, но несовместимых описаний микромира – со временем трансформировалась в более широкую рамку для осмысления природы знания и реальности. Развитие этого принципа в контексте реляционных интерпретаций квантовой механики, таких как подход Карло Ровелли, демонстрирует его способность описывать фундаментальные особенности мира, где свойства и явления существуют только в сети взаимодействий [11]. В области искусственного интеллекта дополнительность помогает балансировать между точностью и интерпретируемостью, эффективностью и этикой, открывая пути для создания более ответственных технологий [9; 6].

В 2024–2025 годах значимость принципа дополнительности становится еще более очевидной на фоне глобальных вызовов и технологических революций. Его применение выходит далеко за пределы физики, охватывая такие области, как квантовая биология, где он помогает сочетать классические и квантовые уровни описания биологических процессов [14]; климатология, где он позволяет интегрировать разные модели прогнозирования [3]; и социальные науки, где он способствует диалогу между количественными и качественными методами. Более того, в условиях цифровой эпохи и роста неопределенности – от изменения климата до геополитических кризисов – принцип дополнительности становится основой для междисциплинарного мышления, позволяя ученым, технологам, философам и политикам работать вместе, признавая ограничения каждой отдельной дисциплины и ценность разнообразия подходов [2; 13].

Кроме того, дополнительность приобретает новое этическое измерение. В эпоху квантовых технологий, генной инженерии и ИИ она напоминает о необходимости сочетать прогресс с ответственностью, инновации с заботой о будущем человечества. Новейшие исследования и инициативы 2024–2025 годов, включая обновленные руководства по этике технологий от ЮНЕСКО и проекты в области объяснимого ИИ, показывают, что принцип Бора может служить ориентиром для создания более сбалансированных решений в сложных и многогранных областях [13].

В заключение можно сказать, что принцип дополнительности сегодня – это не только характеристика квантового мира, но и общая стратегия мышления, которая помогает справляться с неопределенностью и сложностью современного мира. Он учит нас принимать множественность перспектив, признавать контекстуальность истины и искать баланс между различными формами знания. В условиях стремительного развития науки и технологий 2024–2025 годов дополнительность остается не просто историческим достижением, а живым инструментом для формирования новых парадигм мышления, которые будут определять будущее человечества. Этот принцип вдохновляет на диалог, сотрудничество и ответственный подход к решению глобальных проблем, напоминая, что в сложном мире нет единственного правильного ответа, но есть множество путей, которые дополняют друг друга.

Литература

1. Бор Н. Атомная физика и человеческое познание. М.: Наука, 1961.
2. Стёпин В. С. Теоретическое знание. М.: Прогресс–Традиция, 2000.
3. Brown A., Taylor S. Complementarity in Climate Modeling: Integrating Diverse Approaches // *Climate Dynamics*. 2025. Vol. 48. P. 200–215.
4. Bub J. *Bananaworld: Quantum Mechanics for Primates*. Oxford: Oxford University Press, 2016.
5. Floridi L. *The Philosophy of Information*. Oxford: Oxford University Press, 2011.
6. Garcia M., Patel R. Ethical Dimensions of AI: Balancing Efficiency and Accountability / *AI Ethics*. 2024. Vol. 3. P. 112–130.
7. Heisenberg W. *Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science*. New York: Harper & Row, 1958.
8. Ladyman J., Ross D. *Every Thing Must Go: Metaphysics Naturalized*. Oxford: Oxford University Press, 2007.
9. Mittelstadt B., Russell C., Wachter S. Explaining explanations in AI // *Proceedings of the Conference on Fairness, Accountability, and Transparency (FAT*)*. 2019.

10. Plotnitsky A. Complementarity: Anti–Epistemology after Bohr and Derrida. Durham: Duke University Press, 1994.
11. Rovelli C. Helgoland. New York: Riverhead Books, 2021.
12. Smith J., Lee K. Quantum Contextuality in Hybrid Computing Systems // Nature Quantum Information. 2024. Vol. 10. P. 45–52.
13. UNESCO. Updated Guidelines on Ethics of Technology and AI. Paris: UNESCO Publishing, 2024.
14. Zhang L., Kowalski T. Relational Interpretations in Quantum Biology // PNAS. 2025. Vol. 122. P. 301–310.
15. Zurek W. H. Quantum Darwinism // Nature Physics. 2009. Vol. 5. P. 181–188.

N. BOHR’S PRINCIPLE OF COMPLEMENTARITY AND ITS PHILOSOPHICAL SIGNIFICANCE IN THE 21ST CENTURY

Bryusov I. I. (Independent Researcher)

Abstract. The article analyses Niels Bohr’s principle of complementarity, its historical roots, philosophical significance, and applications in the 21st century. The study examines the historical and scientific preconditions for the emergence of the principle, its epistemological and ontological interpretations, as well as contemporary fields of application – including philosophy of science, quantum biology, quantum theory, artificial intelligence, and ethical dilemmas associated with emerging technologies. Particular attention is given to relational interpretations of quantum mechanics, the problem of explainability of AI, and new challenges related to quantum technologies and global environmental issues in 2024–2025. Based on the analysis, it is shown that the principle of complementarity retains and even enhances its heuristic, methodological, and ethical significance in the context of growing complexity of scientific knowledge and interdisciplinary collaboration. The paper further develops conclusions about the role of the principle in shaping new paradigms of thinking related to uncertainty and systemic interconnectedness.

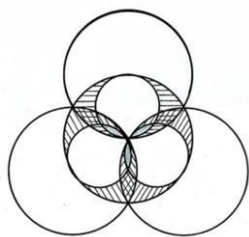
Keywords: Niels Bohr, principle of complementarity, quantum mechanics, philosophy of science, artificial intelligence, relational quantum mechanics, epistemology, explainability, quantum biology, technology ethics, quantum technologies, interdisciplinarity.

References

1. Bohr N. Atomic Physics and Human Knowledge. Moscow: Nauka, 1961.
2. Stëpin V.S. Theoretical Knowledge. Moscow: Progress-Traditsiya, 2000.
3. Brown A., Taylor S. Complementarity in Climate Modeling: Integrating Diverse Approaches // Climate Dynamics. 2025. Vol. 48. P. 200–215.

4. Bub J. Bananaworld: Quantum Mechanics for Primates. Oxford: Oxford University Press, 2016.
5. Floridi L. The Philosophy of Information. Oxford: Oxford University Press, 2011.
6. Garcia M., Patel R. Ethical Dimensions of AI: Balancing Efficiency and Accountability // AI Ethics. 2024. Vol. 3. P. 112–130.
7. Heisenberg W. Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science. New York: Harper & Row, 1958.
8. Ladyman J., Ross D. Every Thing Must Go: Metaphysics Naturalized. Oxford: Oxford University Press, 2007.
9. Mittelstadt B., Russell C., Wachter S. Explaining explanations in AI // Proceedings of the Conference on Fairness, Accountability, and Transparency (FAT*). 2019.
10. Plotnitsky A. Complementarity: Anti–Epistemology after Bohr and Derrida. Durham: Duke University Press, 1994.
11. Rovelli C. Helgoland. New York: Riverhead Books, 2021.
12. Smith J., Lee K. Quantum Contextuality in Hybrid Computing Systems // Nature Quantum Information. 2024. Vol. 10. P. 45–52.
13. UNESCO. Updated Guidelines on Ethics of Technology and AI. Paris: UNESCO Publishing, 2024.
14. Zhang L., Kowalski T. Relational Interpretations in Quantum Biology // PNAS. 2025. Vol. 122. P. 301–310.
15. Zurek W. H. Quantum Darwinism // Nature Physics. 2009. Vol. 5. P. 181–188.

УДК 621.382:621.315.592:338.45



СИСТЕМНЫЙ ВЗГЛЯД НА СОСТОЯНИЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МАТЕРИАЛАМИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРОИЗВОДСТВ В РФ.

ЧАСТЬ 2

Левонич Б. Н. АО «МНТЦ МИЭТ

levbn2008@yandex.ru

Аннотация. Во второй части аналитического обзора системно рассмотрено современное состояние и ключевые проблемы обеспечения отечественных электронных производств материалами в условиях санкционных ограничений. Детально рассмотрено мировое и российское производство ключевых радиоэлектронных материалов: лазерных монокристаллов на основе ИАГ, активированных Nd, Er, Yb, Ce, Cr, Tm, Ho, кварца и других. Приведены данные об объёмах рынка, технологических уровнях, основных производителях и имеющихся отечественных разработках. Сформулированы предложения по концентрации усилий на критически важных группах материалов, развитию комплексных (сквозных) проектов, усилению координации между разработчиками аппаратуры и материалов, а также по сотрудничеству с Республикой Беларусь. Обзор предназначен для специалистов в области электронного материаловедения, разработчиков ЭКБ и лиц, принимающих решения в сфере промышленной политики.

Ключевые слова: электронная компонентная база (ЭКБ), импортозамещение, материалы для микроэлектроники, полупроводниковые монокристаллы, кремний, арсенид галлия, карбид кремния, нитрид галлия, германий, широкозонные полупроводники, санкционные ограничения, федеральные целевые программы, технологическая независимость, анализ альтернатив, производство пластин, силовая электроника, оптоэлектроника, СВЧ-электроника.

Монокристаллы и эпитаксиальные структуры на основе полупроводников группы A^2B^6 .

ZnCdTe (ЦКТ) и CdHgTe (КРТ) - основные полупроводниковые фоточувствительные материалы.

Фотоприёмные устройства (ФПУ) инфракрасного (ИК) диапазона являются основой большой группы систем визуализации изображения специального и гражданского назначения, в том числе тепловизоров для армии и флота, биноклей, прицелов, систем наведения беспилотных самолетов, наземных боевых роботов, а также гражданских систем технического зрения, охраны периметров, обеспечения безопасности судоходства, контроля и охраны водных и прибрежных объектов.

Основой ФПУ являются полупроводниковые фоточувствительные материалы. В последнее время круг этих исходных материалов для инфракрасной фотоэлектроники обозначился

достаточно ясно. К ним прежде всего относится соединение кадмий-ртуть-теллур (HgCdTe , КРТ) для спектральных диапазонов 1–2,5 мкм; 3–5 мкм; 8–14 мкм и антимонид индия (InSb) для диапазона 3–5 мкм (рис. 1). Значительное расширение областей применения ФПУ коротковолнового ИК диапазона спектра (0,9–1,7 мкм) привело к развитию технологии получения тройного полупроводникового соединения индий-галлий-мышьяк (InGaAs), появлению охлаждаемых ФПУ на основе сверхрешеток (InAs/GaSb Type II SL) и квантовых ям (QW, QD). В настоящее время лидирующее место среди материалов для изготовления инфракрасных ФПУ занимают твердые растворы кадмий-ртуть-теллур (КРТ). Это обусловлено физическими свойствами КРТ (большим быстродействием, возможностью изменения ширины запрещенной зоны КРТ в широких пределах и высокой квантовой эффективностью в диапазоне перекрываемых длин волн). Твердые растворы $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (кадмий-ртуть-теллур, КРТ) занимают лидирующее положение среди материалов, на основе которых разрабатываются инфракрасные фотоэлектрические детекторы излучения.

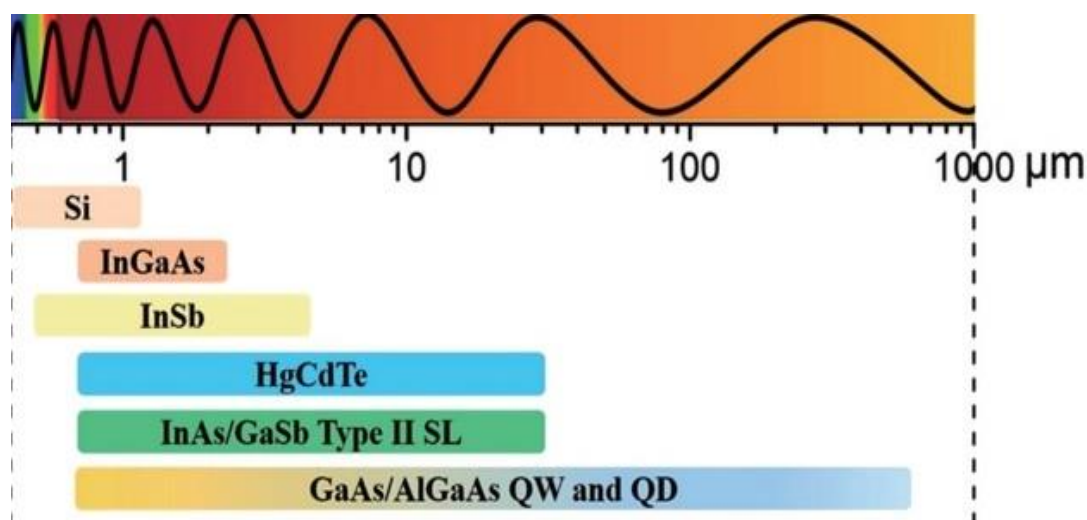


Рис. 1. *Материалы для ИК-детекторов различных диапазонов*

Благодаря тому, что HgTe обладает инвертированной зонной структурой или, иначе, «отрицательной» шириной запрещенной зоны, в твердом растворе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ можно сформировать материал с шириной запрещенной зоны в диапазоне от 0 до 1,6 эВ и настроить детектор на выбранное окно прозрачности атмосферы.

За последние 25 лет технология получения КРТ интенсивно развивалась, что позволило перейти от изготовления относительно небольших диаметров (менее 10 мм) объемных монокристаллов к эпитаксиальным слоям на подложках большого диаметра (до 75 мм). Эпитаксиальные слои КРТ на подложках большого диаметра необходимы для создания матричных ИК ФПУ с большим числом элементов для повышения производительности, производства и снижения стоимости изделий (рис. 2).

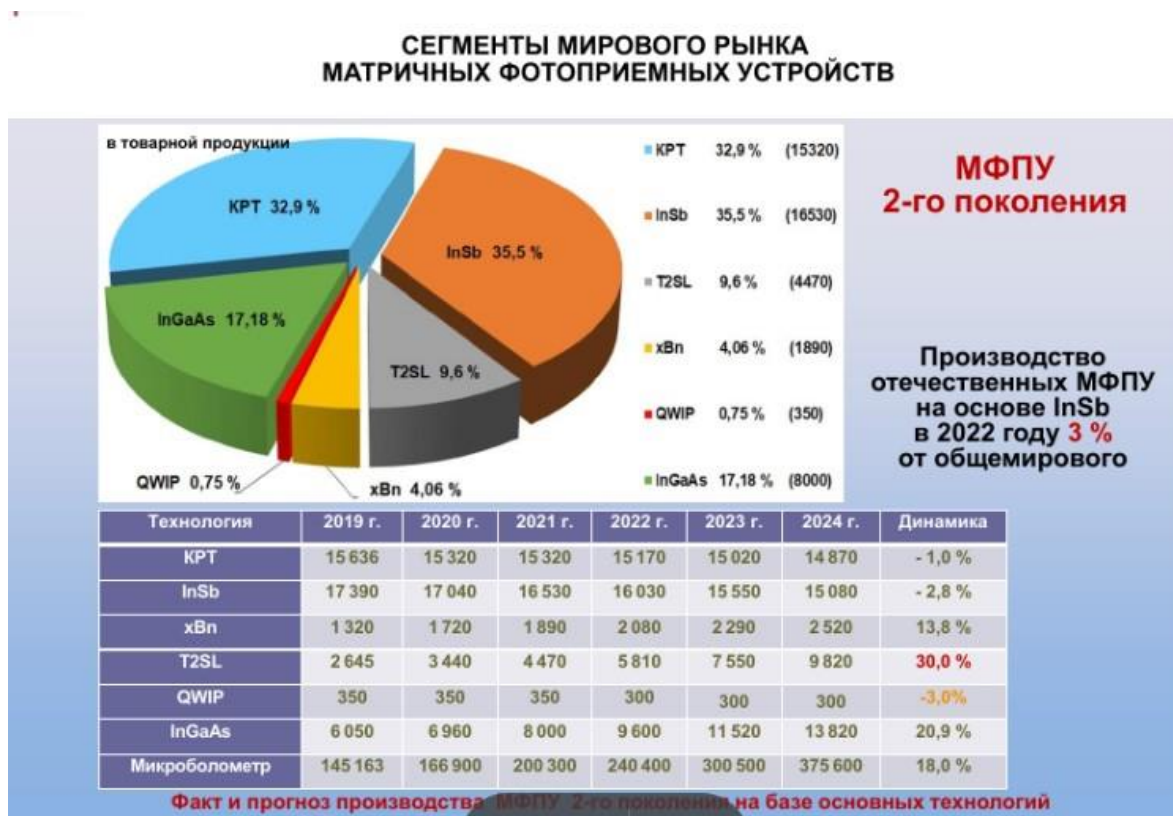


Рис. 2. Сегменты рынка матричных устройств

К эпитаксиальным технологиям получения материала КРТ для подобных ИК ФПУ предъявляются жесткие требования – высокое структурное совершенство и однородность фотоэлектрических свойств по площади. Успехом эпитаксиальных методов являются как прогресс в увеличении размеров и структурного совершенства монокристаллических подложек кадмий-цинк-теллур (CdZnTe, КЦТ) согласованных по параметру решетки с выращиваемой пленкой КРТ, так и возможность выращивания гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) на альтернативных подложках – буферные слои из CdTe и CdZnTe на подложках из GaAs, Si и других. Использование подложек из CdZnTe позволяет выращивать эпитаксиальные структурно совершенные структуры CdHgTe с низкой плотностью прорастающих дислокаций.

В России проблема обеспечения разработок и производства в области ИК-фотоэлектроники качественными отечественными фоточувствительными материалами, отвечающими современным требованиям, стоит достаточно остро. К настоящему времени удалось разработать технологии и создать производственные участки по выпуску отдельных видов фоточувствительных материалов, в том числе монокристаллов антимонида индия, эпитаксиальных структур КРТ, а также полупроводниковых подложек кадмий-цинк-теллур. Разработкой фотоприемных устройств различного назначения в России занимается ряд организаций, входящих в АО «Швабе», АО «Росэлектроника», Российскую академию наук, а также в частные предприятия. Основными поставщиками тепловизионных ФПУ и МФПУ

являются АО «НПО «Орион» и АО «МЗ Сапфир», входящие в АО «Швабе», а также частное предприятие АО «ОКБ «Астрон».

АО «НПО «Орион» разрабатывает и ведет производство охлаждаемых и неохлаждаемых фотоприемников, материаловедческая база предприятия ориентирована на молекулярно-лучевую эпитаксию.

АО «МЗ «Сапфир» производит охлаждаемые и неохлаждаемые ФПУ на основе монокристаллических Si, Ge, InSb, CdHgTe.

АО «НИИ «Полюс» развивает неохлаждаемые ФПУ на основе InGaAs методом эпитаксии из металлоорганических соединений.

Предприятия АО «Росэлектроника» (АО «НПП «Пульсар», АО «ЦНИИ «Электрон», АО «ЦНИИ «Циклон», АО «НПП «Восток») специализируются на разработке и производстве матриц видимого диапазона на основе кремния, охлаждаемых МФПУ на основе квантовых ям, барьера Шоттки из силицида платины, видиконов, пироэлектрических приемников и глубокоохлаждаемых ФПУ на основе примесного кремния.

Институт физики полупроводников Сибирского отделения РАН развивает ФПУ на основе CdHgTe, InAs, микроболометров и квантовых ям.

АО «ОКБ «Астрон» (г. Лыткарино) разрабатывает и производит тепловизионные приборы гражданского назначения на основе неохлаждаемых ФПУ собственного производства, а также охлаждаемых ФПУ на основе CdHgTe совместно с ИФП СО РАН.

Ведущие отечественные потребители гетероструктур КРТ:

- АО «НПО «Орион», г. Москва;
- АО «Московский завод «Сапфир», г. Москва.

Потенциальные потребители подложек КЦТ:

- АО «НПО «Орион», г. Москва;
- Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск;
- Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых РАН, г. Нижний Новгород.

Монокристаллы ЦКТ в качестве материалов-подложки для КРТ используют Орион и ИФП РАН, а для детекторов ионизирующего излучения на основе ЦКТ предприятия ГК Росатом. Основными изготовителями этих материалов долгие годы являются АО «Гиредмет» и АО «НИИМВ». Технологии, используемые этими организациями, существенно различны, в «Гиредмете» – это вертикальный метод Бриджмена по выращиванию монокристаллов в кварцевой ампуле, в «НИИМВ» – рост монокристаллов через газовую фазу из предварительно синтезированного поликристаллического материала ЦКТ. В первом случае получаются

кристаллы с монокристаллическими блоками диаметром выше 20 мм, во втором - монокристаллы диаметром до 60 мм. Экспериментальные эпитаксиальные слои КРТ разрабатываются в ИХВВ РАН по заказам отдельных организаций. Структурное совершенство подложек из паровой фазы выше, чем из расплава. Плотность дислокаций кристаллов из расплава $(0,8-1,0) \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$, плотность дислокаций кристаллов из паровой фазы $(0,8 \div 3) \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$. Основные зарубежные производители и размеры структур CdTe, CdZnTe представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные зарубежные производители и размеры структур CdTe, CdZnTe

Производители	Материал	Диаметр/размеры
Eurorad, Франция	CdTe, CdZnTe	50 мм
Acrorad, Япония	CdTe	50–75 мм
Orbotech, Израиль	CdZnTe	40 x 40 мм ²
Yinnel Tech, США	CdZnTe	50–75 мм
Redlen, Канада	CdZnTe	50 мм
eV Products, США	CdZnTe, CdTe	140 мм

Требования к подложкам ZnCdTe для МЛЭ HgCdTe

Материал – твёрдый раствор CdZnTe.

Геометрические размеры – 25x25 мм $\pm 0,5$ мм.

Толщина – 1000 мкм ± 10 мкм.

Ориентация – (211) с отклонением не более 0.25 град.

Концентрация Zn – 4%.

Отклонение концентрации Zn:

<4% $\pm 1\%$ от пластины к пластине;

<4% $\pm 0,5\%$ по пластине.

Концентрация носителей - полуизолятор.

Сопротивление – не менее $1 \cdot 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Плотность дислокаций - не более $1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$.

Двойники – не допускаются

Размеры включений Te <10 мкм.

ИК пропускание % (2–20) мкм >60%.

Полная ширина кривой качания на полувысоте – не более 20 угловых секунд (пики не расщепляются).

Тыльная сторона В полированная (зеркальная полировка).

Шероховатость поверхности <10 нм.

Параметры кристаллов	АО «Гиредмет»
Состав твердого раствора, x , мол. доля	0,10
Диаметр кристалла, мм	80–100
Удельное электрическое сопротивление, Ом·см, более	$(1,0–10) \cdot 10^9$
Параметр $\mu\tau_e$ для электронов, $\text{см}^2/\text{В}$, более	$0,8 \cdot 10^{-3}$
Параметр $\mu\tau_p$ для дырок, $\text{см}^2/\text{В}$, более	$0,1 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2. *Параметры выпускаемых фотоприемных устройств на подложках из КРТ*

Число элементов	Топология	Размер элемента, мкм	Шаг, мкм	Граничная длина волны, мкм	Апертурный угол	Обнаружительная способность, $\text{см Гц}^{1/2} \text{ Вт}^{-1}$
32 × 32	N × N	40 × 40	70	10,5	60°	$(3–4) \times 10^{10}$
128 × 128	N × N	30 × 30	35	10,5	60°	$(3–4) \times 10^{10}$
384 × 288	N × N	30 × 30	35	10,5	60°	$(2–3) \times 10^{10}$
4 × 48	4 × N	30 × 30	60	10–10,5	60°	$\geq 7 \times 10^{10}$
2 × 96	2 × 2N	30 × 30	60	10–10,5	51°	$\geq 5 \times 10^{10}$
2 × 256	2 × 2N	35 × 35	70	10,5 11,5 12,5	64°	$(4–5) \times 10^{10}$

Однако, несмотря на затраченные гигантские усилия и средства, подложки большой площади из CdZnTe остаются дорогим и эксклюзивным изделием с невоспроизводимыми характеристиками. В связи с этим повсеместно разрабатываются технологии создания гетероструктур CdHgTe на альтернативных подложках, таких как Si, GaAs, Ge. Использование крупноформатных подложек из кремния позволяет получать матричные фоточувствительные элементы, согласованные по коэффициенту термического расширения с кремниевой интегральной микросхемой считывания сигнала (мультиплексором). Большое различие параметров кристаллических решеток, химическая и структурная несогласованность КРТ на подложках Si делает задачу разработки и изготовления ИК ФП на основе гетероструктур КРТ/Si, с параметрами, не уступающими параметрам ИК ФП на основе структур КРТ на согласованных подложках CdZnTe, весьма сложной. Молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) превосходит другие эпитаксиальные методы выращивания слоев КРТ на альтернативных подложках благодаря в первую очередь низким температурам роста ($\sim 180^\circ\text{C}$), что предотвращает диффузию примесей из подложки и снижает фоновое легирование примесями. Технология МЛЭ КРТ достигла уровня, необходимого для приготовления материала для практических приложений. Материал

приборного качества выращен с составами КРТ для диапазона длин волн от 1 до 20 мкм. Была изготовлена гибридная матрица 256 x 256 элементов ИК ФП на подложке из GaAs на длины волн 8–10 мкм и продемонстрировано изображение. Ведутся интенсивные работы по выращиванию эпитаксиальных пленок КРТ на подложках большого диаметра из кремния. Метод МЛЭ позволяет создавать гетероэпитаксиальные слои (ГЭС) КРТ для многоцветных ИК ФП.

При гетероэпитаксии КРТ методом МЛЭ на альтернативных подложках возникает необходимость решения сложных физических и технических проблем. Физические проблемы при гетероэпитаксии КРТ на подложках из GaAs и Si обусловлены большими различиями в параметрах решеток сопрягаемых материалов, различной природой химической связи, низкой скоростью диссоциации и реиспарения молекул двухатомного теллура. Это приводит к ухудшению структурного совершенства и увеличению плотности дислокаций в ГЭС КРТ примерно на один-два порядка по сравнению с объемными кристаллами. В ИФП СО РАН разработано и изготовлено российское оборудование для выращивания КРТ методом МЛЭ. Проведены комплексные исследования всех этапов выращивания гетероэпитаксиальных структур CdTe и CdHgTe на подложках из арсенида галлия и кремния ориентацией (013) диаметром до 100 мм. Подложки, ориентированные по плоскости (013), позволяют выращивать слои КРТ с высокими параметрами в более широком диапазоне условий роста по сравнению с наиболее часто используемыми подложками, имеющими ориентацию (211). В результате разработана технология, позволяющая создавать на альтернативных подложках нелегированные и легированные индием (In) пленки CdHgTe с низкой плотностью морфологических и структурных дефектов.

Молекулярно-лучевая эпитаксия проявила себя наиболее перспективным методом приготовления структур на основе КРТ. Эта технология позволяет при массовом производстве эпитаксиальных структур на подложках из GaAs и Si снизить стоимость структур на основе КРТ, что является необходимым условием их широкого применения в инфракрасных сенсорах. Метод обладает практически неограниченными возможностями совершенствования инфракрасных сенсоров и дает возможность приготовления структур для приборов новых классов.

На полученных структурах в ИФП СО РАН изготовлены матричные фотоприемники различного формата на диапазоны длин волн 1–3, 3–5 и 8–14 мкм, работающие как при 77К, так и повышенных температурах, с параметрами не уступающими зарубежным аналогам. Изготовлен фотоприемник формата 2000x2000 элементов для средневолнового спектрального диапазона.

В настоящее время работы по фотоприемникам продолжаются. В 2024 году Минпромторгом РФ планируется выполнение ОКР: «Разработка гетероструктур с фоточувствительным эпитаксиальным слоем кадмий-ртуть-теллур, легированным золотом, для

высокотемпературных матричных фотоприемных устройств ИК диапазона спектра», шифр «Золото». В ходе выполнения ОКР «Золото» должны быть разработаны 4 (четыре) марки материала различающихся по химическому составу функционального эпитаксиального слоя $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ и геометрическим размерам рабочей поверхности. Разрабатываемый материал для всех марок должен представлять собой гетероструктуру, состоящую из монокристаллической подложки кадмий-цинк-теллур (КЦТ) с кристаллографической ориентацией (111) и оптическим пропусканием в спектральном диапазоне от 2,5 до 16 мкм не менее 55% и выращенного на одной из ее сторон методом ЖФЭ эпитаксиального слоя $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ дырочного типа электропроводности, легированного золотом.

Основные размеры, геометрические и конструкционные параметры материала при приемке и поставке должны соответствовать значениям, приведенным в таблице 3.

Таблица 3. Основные размеры, геометрические и конструкционные параметры материала при приемке и поставке

№	Наименование параметра, единица измерения	Норма параметра			
		марка 1	марка 2	марка 3	марка 4
1	Размер рабочей поверхности гетероструктуры, мм/мм, не менее	30x30	35x40	30x30	35x40
2	Толщина эпитаксиального слоя $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, мкм	8 ± 2	8 ± 2	8 ± 2	8 ± 2

Лазерные и электрооптические кристаллические материалы

В настоящее время лазерные технологии и устройства находят применение практически во всех сферах деятельности современного человека, включая традиционные направления деятельности и развитие новых. Мировой рынок лазерных систем увеличивается в среднем на 10 % в год и прогнозируется, что к 2029 году объем рынка составит порядка 30 миллиардов долларов в год [19]. Рынок лазерных систем России в мировом рынке менее 1 %. Производителями лазерной, оптической и оптоэлектронной продукции в России является около 230 организаций [5]. Более 60 % таких организаций – малые предприятия.

Производством продукции фотоники на российских предприятиях занимаются в общей сложности около 38,5 тысяч человек. Доля продукции российского производства в общем объеме продаж продуктов фотоники составляет около 20 %, при том, что на 90 % она производится из импортных материалов. Более 80 % монокристаллических активных сред для лазерных систем, производимых в России, импортируются из-за границы. Такое положение дел сложилось в связи с тем, что в России не развивалась промышленная база производства лазерных монокристаллов и изготовление из них лазерных активных элементов.

Все применяемые в мире лазерные среды можно условно разделить на три группы:

1 группа – это традиционно используемые лазерные среды на основе монокристаллов иттрий алюминиевого граната (YAG) с различными активаторами;

2 группа – это монокристаллы ванадатов, вольфрамов, а также иттрий алюминиевый фторид и иттрий алюминиевый перовскит с различными активаторами,

3 группа – это кристаллы для нелинейной оптики.

Состояние и проблемы производства лазерных монокристаллов на основе ИАГ, активированных Nd, Er, Yb, Ce, Cr, Tm, Ho

В настоящее время основными материалами для твердотельных лазеров являются активные лазерные элементы на основе алюмоиттриевого граната, активированные редкоземельными и переходными металлами, такими как Nd, Er, Yb, Ce, Cr, Tm, Ho. Самым применяемым лазерным элементом их этой группы материалов является алюмоиттриевый гранат, активированный неодимом. В настоящее время экспериментальным и лабораторным изготовлением лазерных кристалл занимаются ряд учреждений Высшей школы, организаций РАН и малых предприятий частного бизнеса, однако единственным российским сертифицированным производственным предприятием, изготавливающим лазерные активные элементы из монокристаллического алюмоиттриевого граната ($Y_3Al_5O_{12}$) для изделий общепромышленного и специального назначения, является ООО НПФ «Экситон» (г. Ставрополь). Предприятие обладает полным циклом производства активных лазерных элементов, начиная от выращивания монокристаллов, нанесения соответствующих оптических покрытий на готовые элементы и их сертификацию. Номенклатура изготавливаемых изделий включает весь ряд монокристаллов YAG, активированных Nd, Er, Yb, Ce, Cr, Tm, Ho. Размерная линейка лазерных активных элементов варьируется от $\varnothing 3 \times 10$ мм до $\varnothing 15 \times 150$ мм. Объемы выпускаемой продукции более одной тысячи шт. в год, 70 % которой поставляется заказчикам в рамках Государственного оборонного заказа (ГОЗ).

Твердотельная активная среда Nd:YAG имеет 3 основных лазерных перехода на длинах волн 1064 нм, 1319 нм, 946 нм. Основной переход неодима 1064 нм имеет высокое усиление, большое время жизни верхнего уровня, низкий порог генерации. Кристаллы выращиваются преимущественно методом Чохральского. За многие годы технология роста этих кристаллов достигла высоких показателей оптического качества монокристаллов и их структурного совершенства. Лазеры на Nd:YAG используют оптическую накачку с помощью газоразрядных ламп или ИК лазерных диодов. Основная длина волны излучения легко преобразуется нелинейными кристаллами в излучение 532 нм (вторая гармоника), 355 нм (третья гармоника) и 266 нм (четвертая гармоника). Концентрация неодима в лазерных элементах составляет порядка

0,2–1,4%. Высокий уровень концентрации неодима позволяет добиться лучшего поглощения излучения накачки, однако приводит к уменьшению времени жизни верхнего лазерного уровня из-за увеличения числа безизлучательных переходов.

Твердотельный Nd:YAG лазер имеет простую и компактную конструкцию и относительно высокий КПД. Генерируемое им излучение имеет линейно поляризованный характер, поэтому он используется в лазерной физике и нелинейной оптике в качестве основного источника излучения.

В промышленности неодимовый YAG лазер применяется для сварки, резки металлов, обработки малогабаритных деталей, создания плазмы при лазерном термоядерном синтезе и в измерительном оборудовании. Лазеры на основе Nd:YAG также востребованы в научных исследованиях и в медицине. Это обусловлено высокой мощностью создаваемого ими излучения и значительным проникновением этого излучения в глубину биологических тканей на 6–8 мм. Перспективным материалом для создания лазерных приборов являются монокристаллы алюмоиттриевого граната активированного совместно неодимом с церием (Nd:Ce:YAG) концентрацией Nd^{3+} 0,1–1,3 ат % и Ce^{3+} 0,01–0,13 ат %, излучающих таких же как и Nd:YAG, но с большей эффективностью и меньшими габаритами. В целях перехода к крупноформатным кристаллам Nd:YAG и Nd:Ce:YAG компания «Экситон» проводит модернизацию классического метода роста кристаллов по Чохральскому и ростового оборудования на базе установок роста Кристалл-3М. В планах компании стоит разработка технологии синтеза монокристаллов алюмоиттриевого граната легированных Nd и Nd:Ce диаметром до 50 мм и длиной до 200 мм. По завершению работы планируется дальнейшее развитие технологии синтеза для получения монокристаллов YAG легированных Nd и Nd:Ce диаметром до 100 мм и длиной до 200 мм.

В настоящее время ООО НПФ «Экситон» решает задачу расширения производства промышленных монокристаллов на базе YAG с линейкой переходных (Cr) и редкоземельных металлов (Er, Yb, Tm, Ho). Эти материалы расширяют диапазон применимости российских лазерных приборов в народном хозяйстве. Например, активные лазерные элементы Er:YAG с низкой концентрацией активатора менее 1 ат % являются основой для создания безопасных для глаз лазерных приборов излучающих в диапазоне длин волн 1,6–1,7 мкм, для использования в лазерных дальномерах, лидарах, приборах обнаружения утечек газов метановой группы и ряда других специальных применений. Активные лазерные элементы Er:YAG с высокой концентрацией активатора ~50 ат % излучающие на длине волны 2,94 мкм найдут широкое применение для медицинских процедур, например лазерная шлифовка кожи человека, лечение рубцов от прыщей, глубоких морщин и меланодермии, для резки костей и мягких тканей, а также в стоматологии. Для накачки такого твердотельного лазера можно использовать лазерные диоды

излучающих в диапазоне 1470–1532 нм. Благодаря низкой дефектности кристалла достигается высокая эффективность генерации.

Другой лазерный кристалл Ho:YAG обладает излучением имеющим высокий коэффициент пропускания в атмосфере и является перспективным в применении в системах дистанционного зондирования, лазерной локации, лазерных радарх и т.д. Длина волны 2100 нм находится в пике поглощения молекулы воды, которая хорошо поглощается тканями человека. Поэтому он широко используется в медицинской хирургии. Ho:YAG также можно использовать в качестве источника накачки нелинейного оптического кристалла, например ZnGeP₂, что позволяет реализовать инфракрасный лазер с длиной волны в диапазоне 3–5 мк.

Активные лазерные элементы из монокристаллов алюмоиттриевого граната, активированного иттербием Yb³⁺ концентрацией 1,0–10,0 ат % (Yb:YAG) излучают при длине волны 1030 нм. Активные лазерные элементы Yb:YAG, благодаря достаточно широкому диапазону длин волн возбуждения обладают сниженными требованиями к системе терморегуляции источника возбуждения и используются в высокомошных лазерах с диодной накачкой для резки и сварки и многофотонной микроскопии, а также для различных исследований с помощью ультракоротких импульсов и лидаров.

В планах компании стоит разработка гибридного метода выращивания крупноформатных высокотемпературных оксидных монокристаллов и модернизация для этих целей ростовых установок «Апекс» (установки предназначены для синтеза кристаллов методом Киропулоса (ГОИ)). Целью работы на первом этапе является разработка технологии выращивания кристалла алюмоиттриевого граната, легированных Er и Yb, диаметром до 180 мм и длиной до 250 мм. При этом следует отметить, что не смотря на большой диаметр кристалла апертура лазерных элементов не будет превышать 60 мм в диаметре. Это обусловлено наличием центрального дефекта и фасеток, занимающих существенную площадь поперечного сечения выращенного кристалла алюмоиттриевого граната.

Современное состояние разработок и проблемы производства групп лазерных монокристаллов на основе ванадатов, вольфраматов, а также Ti:Sapphire, Nd:YLF, Nd:YAP

Основной лазерный материал Nd:YAG имеет широкий спектр достоинств. Вместе с тем Nd:YAG имеет и ряд недостатков:

- ограничение по допустимой концентрации активатора не позволяет создавать компактные современные излучатели;

- узкая линия возбуждения требует необходимость использования сложной системы термостабилизации, которая не позволяет создавать компактные современные излучатели, а также повышает размеры систем с лазерными элементами крупногабаритными элементами;
- сложная реализация на основе Nd:YAG фемтосекундных лазерных систем;
- высокая сложность и стоимость изготовления крупногабаритных элементов для лазерных систем с высокой энергией.

Для преодоления указанных проблем и решения новых задач в лазерной технике в настоящее время находят широкое применение иные твердотельные среды, такие как Nd:GdVO, Nd:YVO, Yb:KYW, Yb:KGdW, а также Ti:Sapphire. В сравнении с Nd:YAG данные материалы обладают рядом технических преимуществ: большим сечением генерационного перехода, лучшими механическими характеристиками, более высокой мощностью генерации излучения, более широким спектром поглощения, большей универсальностью применения. Благодаря этим характеристикам, у данных материалов отсутствуют недостатки присущие Nd:YAG, и их использование позволит расширить технические и технологические возможности российской фотоники для развития опережающими темпами.

Промышленного производства указанных материалов в России нет. Однако, по заказу Минпромторга в ООО НПФ «Экситон» начата работа по разработке промышленной технологии выращивания указанных перспективных монокристаллов и изготовления на их основе лазерных активных элементов Nd:GVO, Nd:YVO, Yb:KYW, Yb:KGW, Ti:Sapphire (ОКР «Элемент»), которые в России, как и монокристаллы, в промышленном масштабе не производились. К концу 2025 года планируется запустить промышленный выпуск лазерных элементов на основе новых материалов, что позволит создавать новые перспективные лазерные системы из российских компонентов.

Nd:YVO. Кристалл ванадата иттрия с неодимом (Nd:YVO) обладает характеристиками, которые делают его подходящим для диодной накачки. Двумя его важнейшими особенностями являются большое сечение генерационного перехода, в 5 раз больше чем в Nd:YAG, и сильная и широкая полоса поглощения в области 808 нм.

Достоинства Nd:YVO наиболее полно реализуются в схемах продольной диодной накачки, и в большинстве коммерческих лазеров на их основе используется накачка с волоконным выходом и малые по размеру кристаллы Nd:YVO. При использовании такой накачки нужна достаточно острая фокусировка, при которой длина активного элемента не должна превышать нескольких миллиметров. В этих условиях кристаллы Nd:YVO с высоким коэффициентом поглощения и большим коэффициентом усиления являются наиболее подходящими. Кристаллы активно используются в непрерывных лазерах с выходной мощностью в 5–10 Вт. В таких лазерах

часто используется генерация второй гармоники (ГВГ) для получения излучения на длине волны 532 нм.

В лазерах на кристаллах ванадата иттрия достигнуты высокие эффективности генерации – оптическая эффективность, определяемая как отношение мощности генерации к мощности накачки, достигает 55–60 %. Благодаря сравнительно короткому времени жизни лазерного уровня, в режиме модуляции добротности с непрерывной диодной накачкой кристаллы Nd:YVO позволяют получать высокие частоты повторения импульсов с длительностью около 10 нс.

Планируется в рамках ОКР «Элемент» вырастить монокристаллы диаметром до 50 мм, длиной до 100 мм и концентрацией активатора (Nd) до 3 ат. %. Будут изготовлены лазерные элементы 16 × 16 мм, высотой 20 мм. Длина волны генерации излучения 1064 мкм близка к излучению Nd:YAG, поэтому может использоваться в качестве задающего генератора в системах генератор-усилитель.

Кристаллы ванадата иттрия используются не только в лазерной технике. Кристалл (матрица) YVO₄ является положительным одноосным двулучепреломляющим кристаллом. Показатель преломления (и Δn) значительно выше, чем у кальцита (CaCO₃). Окно прозрачности шире (0,4...5 мкм), чем у кальцита (0,35...2,3 мкм), однако в УФ пропускание хуже. Твердость выше, чем у кальцита (5 против 3 по шкале Мооса). Поэтому ванадат иттрия находит широкое применение в поляризационных устройствах, работающих в ИК области (до 5 мкм). Особенно в поляризационных устройствах в изоляторах Фарадея в волоконной технике

Nd:GdVO. Кристалл ванадата гадолиния с неодимом (Nd:GdVO) – высокоэффективный материал для твердотельных лазеров с диодной накачкой. Среднее (усредненное по поляризации) сечение поглощения на длине волны 808 нм в 7 раз выше, чем у Nd:YAG, а сечение излучения на длине волны 1,06 мкм в 3 раза выше Nd: YAG. По оптическим свойствам очень схож с Nd:YVO, однако этот материал обладает гораздо большей теплопроводностью, что снижает температурные эффекты, влияющие на качество лазерного пучка. Его можно использовать как в мощных лазерах, так и во всех твердотельных микролазерах с лазерной диодной накачкой (DPSS).

На основе кристаллов Nd:GdVO₄ с рассеянным отражением можно реализовать разработку безопасного для человеческого глаза лазера с длиной волны 1340 нм и 1520 нм. Такой лазер может широко использоваться в радарх, спутниковых устройствах дистанционного зондирования и имеет хорошие перспективы развития.

Yb:KGW. Для применения в качестве активных сред фемтосекундных лазеров с прямой диодной накачкой очень подходящими оказались кристаллы калийгадолиниевого вольфрамата (Yb:KGW), благодаря удачному сочетанию спектроскопических характеристик – высоким сечением поглощения стимулированного излучения, широкой полосе усиления и очень малому

стоксову сдвигу между полосами накачки и генерации (5–6 %). В лазерах на основе кристаллов Yb:KGW с использованием полупроводникового зеркала с насыщающимся поглощением (SESAM) в качестве затвора реализован режим пассивной синхронизации мод с длительностью импульсов 112–180 фс и также коммерческие фемтосекундные лазеры с выходной мощностью до 5 Вт при длительности импульсов около 200 фс. В лазере на основе тонкого диска из кристалла Yb:KGW достигнута выходная мощность 22 Вт при длительности импульсов 240 фс.

Фемтосекундные лазеры с длиной волны около 1 мкм особенно подходят для получения биологических изображений с помощью многофотонной возбуждающей флуоресценции высокого разрешения и генерации третьей и второй гармоник. Более длинные длины волн возбуждения желательны из-за меньшего рассеяния и большей глубины проникновения в биологическую ткань. В значительной степени снижаются автофлуоресценция и отбеливание. Кроме того, генерируемые третья и вторая гармоники попадают в видимый диапазон (а не в ультрафиолетовый), что обеспечивает более высокую пропускную способность и более простую схему визуализации. Ожидается, что кристалл Yb:KGW заменит кристалл Nd:YAG и кристалл Yb: YAG в лазерной системе с диодной накачкой высокой мощности.

Yb:KYW. Кристаллы Yb:KYW очень близки по своим физическим свойствам, спектральным характеристикам и структуре уровней к кристаллам калийгадолиниевого вольфрамата Yb:KGW. На их основе также реализованы фемтосекундные лазеры, регенеративные усилители, а также непрерывные лазеры и лазеры на тонких дисках с пассивной синхронизацией. На основе элементов Yb:KYW разработан компактный лазер с рекордной эффективностью при накачке одномодовым диодным лазером: 64,9 % эффективный КПД и 61 % полный оптический КПД. Получен самостартующийся фемтосекундный режим с длительностью импульса 140 фс, средней выходной мощностью 2 Вт (эффективный и полный оптический КПД составили 40 и 37 %).

Ti:Sapphire. Кристалл Ti:Sapphire является наиболее часто используемым лазерным кристаллом для перестраиваемых в широком частотном диапазоне и сверхкоротких импульсных лазеров с высокими коэффициентами усиления и выходной мощностью. Возможность широкодиапазонной перестройки длины волны излучения титан-сапфирового лазера дает возможность спектрально-селективного возбуждения большого числа атомов и молекул как в спектральной области основного излучения лазера (700–1100 нм), так и в области второй (350–550 нм) и четвертой (200–275 нм) гармоник излучения. Ширина совокупной спектральной области, охватываемой титан-сапфировым лазером более 600 нм. Такая спектральная универсальность позволяет титан-сапфировому лазеру быть «рабочей лошадкой» во многих исследовательских применениях.

Таким образом, все перечисленные монокристаллические материалы расширяют и дополняют линейку монокристаллов на основе иттрий алюминиевого граната.

К активным средам для твердотельных лазеров второй группы относятся также монокристаллы на основе иттрий литиевого фторида (YLF), а также иттрий алюминиевого перовскита (YAP) активированных Nd, Er, Yb, Tm, Ho. Данные материалы являются заменой традиционным гранатам в ряде применений таких как медицина, зондирование атмосферы, голография, оптическая связь и др. Промышленная технология получения этих материалов не разрабатывается и, как следствие, производство данных материалов в России отсутствует. Тем не менее, упомянутые выше кристаллы обладают рядом преимуществ перед традиционным гранатом Nd:YAG и заслуживают внимания для разработки в перспективе.

Nd:YLF. Кристаллы Nd:YLF характеризуются большим временем жизни энергетического уровня неодима. Более низкая по сравнению Nd:YAG теплопроводность и малый отрицательный термо-оптический коэффициент приводят к более слабым термическим искажениям, что позволяет получать лучшее качество выходного пучка лазера. Другая отличительная особенность кристалла Nd:YLF, это высокая прозрачность в УФ-диапазоне, что предпочтительно при использовании накачки ксеноновыми лампами.

Nd:YAP. Кристаллы Nd:YAP принадлежит к отрицательным одноосным кристаллам и является анизотропным. Среди многочисленных лазерных кристаллов, легированных неодимом, кристалл Nd:YAP не только обладает высокой теплопроводностью, но и имеет большее сечение возбужденного излучения. Данные кристаллы являются одними из самых эффективных лазерных кристаллов для работы с большой мощностью излучения на длине волны 1,3 мкм. Кристалл в основном накачивается диодами. Лазеры на 1,3 мкм широко используются в области медицины и оптико-волоконной связи.

Состояние разработки технологии и проблемы промышленного производства лазерных и нелинейно-оптических монокристаллов, работающих в диапазоне спектра 1,5-18 мкм

Наряду с материалами для генерации лазерного излучения представленными в предыдущих разделах необходимы также материалы для управления световыми потоками лазерного излучения устройствах и приборах различного назначения. В настоящее время кристаллы для модуляции лазерного излучения в промышленных масштабах не выпускаются и в значительной степени закупаются за рубежом.

Cr:YAG. Кристаллы Cr:YAG – идеальный материал для пассивной модуляции добротности для лазеров на кристаллах Nd:YAG и других кристаллах, легированных Nd или Yb в диапазоне длин волн от 900 нм до 1200 нм. Важной особенностью кристаллов Cr:YAG является

присущий им высокий порог повреждения интенсивным лазерным излучением >10 Дж/см² при длине волны излучения лазера 1064 нм, и длительности импульса 10 нс. Гранат с хромом имеет полосу поглощения от 900 нм до 1200 нм с максимумом на 1060 нм с очень большим значением сечения поглощения. Концентрация легирующих ионов Cr⁴⁺ в Cr:YAG достигает 10^{18} см⁻³, что позволяет эффективно уменьшить размер элементов пассивного модулятора добротности. Это выгодно для достижения высокой эффективности оптического преобразования, интеграции и компактного пассивного лазера с модуляцией добротности.

Наряду с нелинейно-оптическими свойствами кристалл Cr:YAG также является лазерным кристаллом с настраиваемым выходным излучением от 1,35 до 1,55 мкм. Он может генерировать ультракороткие импульсы (до фс) при накачке лазером Nd:YAG с длиной волны 1,064 мкм.

V:YAG. Кристалл V:YAG – это новый материал лазерного насыщаемого пассивного затвора в диапазоне длин волн 1,06–1,44 мкм. Он особенно подходит для неодимового лазера с длиной волны излучения 1,3 мкм. Обладает хорошей стабильностью, длительным сроком службы, простотой изготовления и практичностью. Ванадиевые затворы используются с большой группой активных лазерных сред, включая Nd:YAG, Nd:YAP, Nd:KGW, Nd:YVO₄.

На основе монокристаллов V:YAG можно изготовить затворы с размерами применимыми для широкоапертурных лазерных элементов, а также использовать в составе композиционных элементов для устранения паразитных излучений. V:YAG применяется в лазерах с пассивной модуляцией добротности для лазерных дальномеров, лидаров, систем лазерно-искровой спектроскопии пробоя, промышленных лазерах и др.

Co:MgAlO. Пассивные затворы на основе кристаллов Co:MgAlO используются в лазерах с короткими наносекундными импульсами с высокой пиковой мощностью на безопасной для глаз длине волны 1,5 мкм, которая также имеет высокую прозрачность в атмосфере. Co:MgAlO является идеальным для дальнометрии, зондировании окружающей среды, телекоммуникациях, хирургии и т.д. телеметрии. В качестве затворов применяется с такими лазерными элементами как Er, Yb стекло, Nd:GYSGG, Nd:YALO₃ на длинах волн от 1,2 до 1,6 мкм.

Однако существует необходимость производства новых материалов, позволяющих реализовать излучение в более широком диапазоне вплоть до 18 мкм и далее до ТГц. Интерес к созданию устройств генерации излучения в диапазонах спектра 1,5–18 мкм связан с широкими возможностями применения устройств этого диапазона излучений, а именно:

- Для решения важных задач военно-технического назначения, таких как активное противодействие системам инфракрасного наведения ракет в оптическом диапазоне 3–8 мкм и 8–14 мкм;

- Мониторинг загрязнения окружающей среды, в т.ч. диагностика многокомпонентных токсичных газов, отравляющих веществ и биологических агентов;
- Дистанционная диагностика утечек углеводородов из мест их хранения и транспортировки;
- Медицинская хирургия и косметология;
- Оперативный экспресс-анализ метаболических процессов в организме человека на основе контроля летучих органических веществ (ЛОВ) в выдыхаемом пациентом воздухе.

В области спектра 1,5–15 мкм находятся основные окна прозрачности атмосферы (1,5–1,8 мкм; 2,0–2,4 мкм; 3,3–4,0 мкм; 4,5–5,1 мкм; 8–14 мкм) (рис. 3).

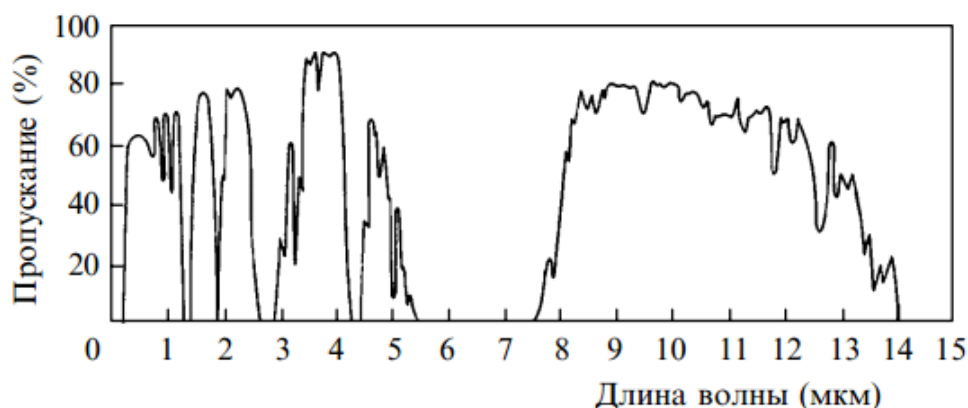


Рис. 3. Спектр пропускания атмосферы на горизонтальной трассе длиной 1882 м на уровне моря

Наиболее эффективным путем расширения диапазона генерации существующих лазеров, в ИК диапазон, является параметрическое преобразование частоты излучения (ППЧ) (рис.4). Важным преимуществом ППЧ является возможность создания твердотельных лазерных систем, способных обеспечить перестройку длины волны излучения в широком спектральном диапазоне [34].

Принцип ППЧ состоит в преобразовании в нелинейных кристаллах частоты (длины волны) излучения одного или нескольких лазеров в требуемый диапазон.

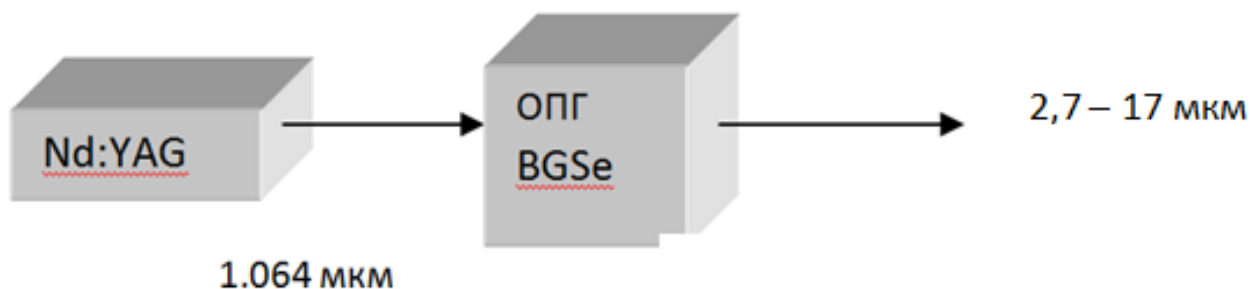


Рис. 4. Широкополосный однокаскадный ИК лазер с накачкой Nd:YAG излучением 1,064 мкм, генерирующий непрерывно перестраиваемое в диапазоне 2,7–17 мкм излучение на кристалле $BaGa_4Se_7$ (BGSe)

Одним из наиболее эффективных способов создания источников излучения, рассматриваемого диапазона является генерация разностной частоты (ГРЧ) между спектральными компонентами широкополосного излучения в нелинейно-оптической среде, например в кристаллах с ненулевой квадратичной восприимчивостью второго порядка [9]. На практике, среди «настоельных» методов генерации ТГц излучения с высокой выходной пиковой интенсивностью, можно выделить два метода генерации излучения в нелинейных кристаллах (НК):

1. Параметрическое преобразование частоты (ППЧ) излучения фемтосекундных лазерных импульсов в оксидных нелинейных кристаллах, таких как LiNbO_3 (LN), с применением схемы с наклонным оптическим фронтом накачки, то есть используя генерацию разностной частоты с выполнением условий векторного синхронизма [10].

2. Генерация разностной частоты при смешении частоты излучения двух лазеров ближнего или среднего ИК диапазона пико- или наносекундной длительности в полупроводниковых нелинейных кристаллах с большими коэффициентами нелинейной восприимчивости, такими как ZnGeP_2 и GaSe и других [1].

Однако, эффективность и выходные энергетические характеристики данных методов лимитируются не мощностью доступных источников накачки, а характеристиками используемых нелинейных кристаллов: уровнем оптических потерь на частотах излучения накачки или генерации, а также низкой эффективностью преобразования при выполнении условий коллинеарного фазового синхронизма (ФС) в первом методе преобразования и низкой лучевой стойкостью во втором. В связи этим, поскольку эффективность трехволнового параметрическое преобразование частоты излучения линейно зависит от интенсивности излучения накачки, актуальной задачей является поиск новых нелинейных кристаллов, которые бы позволяли эффективно преобразовывать высокоинтенсивное излучение фемтосекундных лазеров ближнего ИК диапазона в излучение дальнего ИК диапазона и ТГц диапазон спектра.

В западных зарубежных лабораториях и в Китае активно используется технология ППЧ для разработки плавно-перестраиваемых в диапазоне 3–12 мкм ИК источников на базе нелинейных кристаллов $\text{Z}_x\text{G}_{1-x}\text{P}_2$, GaSe , AgGaSe_2 , HgGa_2S_4 , LiInSe_2 , CdSiP_2 , LiGaS_2 .

В настоящее время существующие кристаллы инфракрасного диапазона имеют характерные, присущие им дефекты, в силу чего *возникают серьезные проблемы* при разработке *высокоэнергетического лазера*, охватывающего длинноволновую область 8–14 мкм. Недавно разработанные в лаборатории высоких технологий Кубанского государственного университета монокристаллы BaGa_4Se_7 и BaHgGeSe_4 в значительной степени снимают эти проблемы.

Ученые ИЛФ СО РАН г. Новосибирск и Томского ГУ сообщили о результатах экспериментального исследования ОПГ на основе кристалла BaGa_4Se_7 с накачкой излучением Nd:YLF-лазера ($\lambda=1,053$ мкм). Была получена перестройка длины холостой волны ОПГ в спектральном диапазоне 2,6–10,4 мкм. С накачкой излучением Nd:YAG-лазера ($\lambda=1,064$ мкм) с частотой повторения 10 Гц в этом же кристалле получена область перестройки 2,7–17 мкм.

В России разработаны лазеры на основе кристаллов ZnGeP_2 (3–5) мкм и (4.3–10.1) мкм, GaSe (4–18) мкм, CdSe (8,1–12) мкм, BHgSe (8–14) мкм. Из приведенных сред наиболее перспективными являются нелинейные лазерные кристаллы BaGa_4Se_7 и BaHgGeSe_4 . В Кубанском государственном университете, где получены эти кристаллы, их выращивают в лабораторных условиях. Применение лазеров в диапазоне от 2,6 до 17 мкм позволяют решать задачи военного-технического назначения, таких как активное противодействие системам ИК наведения управляемых ракет, мониторинга загрязнения окружающей среды в т.ч. диагностика многокомпонентных токсичных газов, дистанционная диагностика утечек углеводородов, медицинская хирургия и косметология, экспресс-анализ метаболических процессов в организме. Реализация широкого спектра излучения ИК диапазона на основе BaGa_4Se_7 и BaHgGeSe_4 производится за счет параметрического преобразования частоты при накачке их лазерами с излучением порядка 2 мкм, таких, например, как Ho:YAG или Tm:YLF.

Промышленное производство данных материалов отсутствует.

Для активной работы по разработке лазерных систем ИК диапазона необходимо также организовать в первую очередь промышленное производство монокристаллов на основе BaGa_4Se_7 и BaHgGeSe_4 .

Кварц (SiO_2)

Кварцевое стекло

Синтетическое кварцевое стекло обладает рядом уникальных свойств оптических, механических и химических свойств:

- высокая однородность;
- низкое поглощение света;
- устойчивость к высоким и низким температурам, а также к амплитудам колебания температур;
- хорошее сопротивление лазерным излучениям высокой мощности;
- стойкость к ионизирующему излучению;
- химически инертно к большинству количеству кислот (исключение – фтористоводородная и ортофосфатная при температуре 300 градусов Цельсия).

Перечисленные свойства кварцевого стекла дают возможность широкого его применения в различных областях приборостроения, химической и электронной промышленности.

Технология производства стекла во многом определяет область дальнейшего его применения. Известно несколько технологий производства синтетического кварцевого стекла: гидротермальным способом, с последующей переплавкой, по золь-гель технологии, и производство по газофазной технологии. Последняя технология является наиболее производительной и позволяет получить стекло с наименьшим примесным химическим составом (суммарное количество примесей не превышает 1 ppm). В свою очередь газофазные технологии производства синтетического кварцевого стекла разделяются по стадийности производства и типу используемого исходного сырья. Одностадийная технология производства, она же технология прямого наплава, используется, как правило, для стекла насыщенного гидроксилами, характеризующими полосы поглощения в ближней инфракрасной области и способностью к восстановлению центров поглощения, появление которых обусловлено высокой энергетической плотностью излучения. Такое кварцевое стекло нашло широкое применение в качестве материала для оптических деталей, работающих в областях с повышенной энергетической нагрузкой – в высокомошных лазерах, в фотолитографических установках, аппаратуре, работающей в ионизирующем излучении. Заготовки стекла в случае одностадийной технологии представляют собой були дискообразной или цилиндрической формы, из которых затем методом механической обработки производятся оптические детали.



Рис. 5. Мировой рынок синтетического кварца

Двухстадийная технология производства стекла за счет дополнительной технологической операции осушки дает возможность получения кварцевого стекла с низким содержанием

гидроксильных групп, что позволяет его использовать в качестве основного материала для оптических волокон. Кроме того, поскольку двухстадийная технология характеризуется тем, что на первой стадии образуется пористая заготовка, которая на второй стадии остекловывается, то возможно изготовление заготовок более сложной формы: труб и тиглей. Это делает синтетическое высокочистое кварцевое стекло предпочтительным при изготовлении тиглей для выращивания ключевого материала микроэлектроники – монокристаллического кремния. Благодаря тому, что кварцевое стекло не взаимодействует с кислотами и другими реактивами, оно широко применяется в процессе производства чистых материалов (реакторы, ампулы и прочих) и микроэлектронике.

В качестве исходного сырья для газофазного производства синтетического кварцевого стекла также имеется широкая вариативность. Наиболее широкое применение нашли тетрахлорид кремния и циклосилоксаны. Они имеют принципиально разные исходные свойства, что налагает различия в используемом оборудовании и технологии их подготовки, но на выходе дающие одинаково хороший и стабильный результат. Преимуществом тетрахлорида является его доступность, как отхода при производстве поликремния, а недостатком его химическую опасность как в исходном состоянии, так и отходов после производства кварца. Циклосилоксан, напротив, инертен на всех этапах и имеет более высокое содержание кремния, что определяет более высокую производительность.

На территории РФ в настоящий момент имеется промышленное производство искусственного кварца только по гидротермальной технологии, в процессе которой выращиваются искусственные кристаллы, из которых впоследствии путём переплавки производят аморфное кварцевое стекло. Переплавка может производиться как газопламенным методом (в этом случае получается стекло с высоким содержанием гидроксильной группы), так и вакуумно-компрессионных печах (в этом случае получается стекло с высоким содержанием гидроксильной группы). Однако высокое (по отношению к стеклу, полученному газофазным способом) содержание металлов существенно ограничивает его применение.

Золь-гель технологии производства стекла являются альтернативой двухстадийному производству кварцевого стекла с низким содержанием гидроксильных групп, но имеет существенно больше техпереходов, на каждом из которых возможно внесение загрязнений, и поэтому не имеют широкого распространения в мировой практике, а на территории РФ ведется лабораторное производство с нестабильным результатом.

Технологии газофазного производства стекла с высоким содержанием гидроксидов на территории РФ в настоящий момент практически утрачены, а с низким содержанием гидроксидов никогда и не были развиты. Поэтому наиважнейшей задачей является создание промышленного

производства синтетического кварцевого стекла как одностадийной, так и двухстадийной газофазной технологии. Это позволит закрыть потребности в стратегическом материала для микроэлектроники и обеспечить технологический суверенитет РФ.

Классификация и технологии кварцевых стекол.

1. Классификация кварцевых стекол.

Кварцевое стекло (далее КС) представляет собой однокомпонентный аморфный материал и является продуктом охлаждения расплава кремнезёма до твёрдого состояния без кристаллизации. КС разделяют на техническое (ТКС) и оптическое (ОКС).

Техническое кварцевое стекло (ТКС)

Для производства технических сортов кварцевого стекла используют, как правило, минеральное сырьё природного происхождения (горный хрусталь, жильный кварц), обогащённое до требуемого по применению уровня или кремнийсодержащее химически очищенное сырьё при двухстадийном производстве. Из технического КС изготавливают кварцевые блоки, трубы и трубки, тигли, реакторы и иные изделия, использующиеся в химической и металлургической промышленности, а также различные изделия, использующиеся в приборостроении и других отраслях промышленности. Из ТКС, кроме того, изготавливают кварцевую керамику, которая используется в ракетостроении, ядерной энергетике и других отраслях промышленности.

При производстве технического КС наибольшее распространение получил метод газопламенного наплава из кварцевой крупки, когда в пламя водородно-кислородной горелки подаётся кварцевая крупка, она быстро оплавляється и капли расплава, попадая на подложку из кварцевого стекла формируют блок наплавляемого стекла. В качестве природного сырья для ТКС чаще используют:

- **горный хрусталь.** Это чистые прозрачные кристаллы кварца, не содержат газовых включений, плотность $\rho=2655$ кг/м³, твёрдость 7. Для получения высокопрозрачного технического стекла используют горный хрусталь, содержание примесей в котором не должно превышать 0,06 ат. %. Это очень дорогой материал. Месторождения: Бразилия, западная Украина, Казахстан (Актасс) и другие.

- **жильный кварц.** Молочно-белый не прозрачный или прозрачный гранулированный материал. Он представляет собой жильную породу, главной составляющей которой является кварц. Существуют две разновидности жильного кварца – гранулированный (агрегат прозрачных частиц) и молочно-белый.

В производстве ТКС используется кварцевая крупка из любой **природной разновидности кварца**. Кварцевая крупка представляет собой фракционированный по размерам продукт природного кварца с размером зёрен от 0,09 до 0,4 мм.

Лидером производства кварцевой крупки в РФ является компания «Русский кварц» базирующаяся на Кыштымском ГОК (г. Кыштым).

Оптическое кварцевое стекло (ОКС)

Оптическое КС по ГОСТ 15130-86 делят на 5 основных типов по светопропусканию:

1. КУ-1 – стекло кварцевое без полос поглощения в интервале длин волн 170–250 нм, с полосами поглощения в интервалах длин волн 2100–2300 нм и 2600–2800 нм;
2. КУ-2 – стекло кварцевое со слабой полосой поглощения в интервале длин волн 170–250 нм, с полосой поглощения в интервале длин волн 2600–2800 нм;
3. КВ – стекло кварцевое с полосами поглощения в интервалах длин волн 170–250 нм и 2600–2800 нм;
4. КИ – стекло кварцевое оптическое, прозрачное в видимой и инфракрасной областях спектра, без полосы поглощения в интервале длин волн 2600–2800 нм;
5. КУВИ – стекло кварцевое прозрачное в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра, со слабыми полосами поглощения в интервалах длин волн 170–250 нм и 320–350 нм, с полосой поглощения в интервале 2600–2800.

Разность в спектральном пропускании обусловлена как технологией производства, так и исходным сырьем, влияющим на наличие примесей.

Технология и сырье для производства кварцевого стекла

Технологии производства технического кварцевого стекла

Наибольшее распространение при производстве технического КС получил метод газопламенного наплава из кварцевой крупки в пламени водородно-кислородной горелки. В качестве природного сырья чаще используют молочно-белый не прозрачный или прозрачный гранулированный материал – *жильный кварц*. Он представляет собой жильную породу, главной составляющей которой является кварц. Существуют две разновидности жильного кварца – гранулированный и молочно-белый. Гранулированный кварц – это агрегат из прозрачных(!) округлых различно ориентированных маленьких гранул(зерен) кварца. Молочно-белый кварц – агрегат из непрозрачных зёрен кварца. Содержит большое количество газовых включений и трещин, которые имеют микроскопические размеры. В состав включений входит углекислый газ, вода, NaCl, KCl и т.д. Для оценки качества кварца используют контроль проб по светопропусканию. Для гранулированного кварца светопропускание = 75 %, а для молочно-белого = 40 %.

В производстве КС используется кварцевая крупка из любой *природной разновидности кварца*. Кварцевая крупка представляет собой фракционированный по размерам продукт природного кварца с размером зёрен от 0,09 до 0,4 мм. Размер зерна регулируется различными

сортами европейской (RQ) и международной (IOTA) спецификации. В производстве кварцевого стекла используют узкие фракции от 0,09 до 0,14 мм.

Технологическая схема подготовки кварцевой крупки из жильного кварца содержит следующие элементы: дробление и измельчение → рассев на фракции → магнитная сепарация → флотационное обогащение → промывка и обезвоживание → сушка → термообработка → контрольное обогащение → упаковка → маркировка.

Флотация – метод обогащения, который основан на разделении компонентов по различию их поверхностных свойств. Смачиваемость в воде в присутствии ПАВ. Термообработка при $t=1000^{\circ}\text{C}$ проводится для вскрытия основных газовых включений, которые содержатся в кварце и повысить степень его чистоты.

Добыча кварца для производства высокочистых кварцевых концентратов ведется с советского периода в г. Кыштым Челябинской области на базе Кыштымского горно-обогатительного комбината (КГОК), представляющего собой уникальную сырьевую базу. Лишь в двух странах в мире ведётся добыча и обогащение кварцевого сырья, служащего базовым материалом для высокотехнологичных отраслей (полупроводники, специальная оптика, солнечная энергетика и т.д.) – в России (Кыштымское месторождение) и в США (месторождение Спрус Пайн). Уникальная чистота сырья и современные технологии его очистки дают возможность достигать качества самых высших мировых стандартов. В настоящее время владельцами 91 % акций АО КГОК является ООО «КварцВИК» (г. Москва), 9 % АО КГОК принадлежит физическим лицам, участникам приватизации предприятия. В 2011 году была создана компания ООО «Русский кварц», учредителями которой являются госкорпорация РОСНАНО (28,69 %), японская компания Sumitomo (28,69 %), АО КГОК (41,78 %) и ООО КварцВИК (0,84 %). В настоящий момент проект разделен на две компании:

- АО КГОК является владельцем лицензии на пользование недрами ЧЕЛ 12724 ТЭ на отработку Кыштымского месторождения сроком до 2040 года и ведет добычу и поставку кварцевой руды ж.175 для ООО «Русский кварц»;
- ООО Русский кварц производит обогащение и реализует высокочистые кварцевые концентраты марок RQ из кварцевой руды ж.175. В частности, сорт RQ-2K, который является аналогом сорта IOTA-Standard и сорт RQ-1K – аналог сорта IOTA-6. В настоящее время проводится добыча, обогащение по схеме, приведенной выше, изготовление крупки и на её основе высокочистых концентратов сортов RQ-2K и RQ-1K, соответствующих мировому уровню. Доля экспортной выручки в структуре реализации компании – 98 %, основные рынки – ЕС, Япония, Китай.

По оценкам специалистов добыча гранулированного кварца жилы 175 сегодняшними

темпами добычи продлится 8–10 лет. Несмотря на то, что на балансе Министерства природных ресурсов находится 4.6 млн. тонн запасов кварцевого сырья (в основном разведанных еще во времена СССР), реально технологически оценен и внедрен в промышленное производство только гранулированный кварц жилы 175 Кыштымского месторождения. В двухтысячные годы были попытки организовать промышленное производство в АО «Полярный кварц» (г. Няган, ХМАО), в становление процесса обогащения и получения крупки, на котором вложены большие средства при поддержке Правительства ХМАО. Однако в настоящее время производство не функционирует. Добываемый материал в «страдную» пору транспортировки (зимой) перевозится на площадку Кыштымского ГОКа, где проводится сортировка и обогащение. Меры, по технологической оценке и обустройству иных месторождений высококачественного прозрачного кварца, несмотря на многочисленные обращения инвесторов в Минприроды РФ, не предпринимаются. Более того, министерство фактически закрыло первичные данные о запасах открытых месторождений высококачественных кварцитов, бюрократически осложнив предоставление инвесторам необходимой информации.

Технологии производства синтетического оптического кварцевого стекла

Синтетическое оптическое кварцевое стекло обладает рядом уникальных оптических, механических и химических свойств, таких как:

- высокая однородность;
- низкое поглощение света;
- устойчивость к высоким и низким температурам, а также амплитудам;
- хорошее сопротивление лазерным излучениям высокой силы;
- стойкость к ионизирующему излучению;
- химически инертно к большинству количеству кислот (исключение – фтористоводородная и ортофосфатная при температуре 300 градусов Цельсия).

Перечисленные свойства оптического кварцевого стекла дают возможность широкого его применения в различных областях приборостроения, химической и электронной промышленности.

В настоящее время основным документом, определяющим качество оптического кварцевого стекла, является ГОСТ 15130-86, который определяет пять групп, которые получают по различным технологиям, используя различное исходное сырье.

Технология производства стекла во многом определяет область дальнейшего его применения. Известно несколько технологий производства синтетического кварцевого стекла: гидротермальным способом, с последующей переплавкой, по золь-гель технологии и производство по газофазной технологии. Последняя технология является наиболее

производительной и позволяет получить стекло с наименьшим примесным химическим составом (суммарное количество примесей не превышает 1 ppm). В свою очередь газофазные технологии производства синтетического кварцевого стекла разделяются по стадийности производства и типу используемого исходного сырья. Одностадийная технология производства, она же технология прямого наплава, используется, как правило, для стекла насыщенного гидроксилами, характеризующими полосы поглощения в ближней инфракрасной области и способностью к восстановлению центров поглощения, появление которых обусловлено высокой энергетической плотностью излучения. Такое кварцевое стекло нашло широкое применение в качестве материала для оптических деталей, работающих в областях с повышенной энергетической нагрузкой – в высокомошных лазерах, в фотолитографических установках, аппаратуре, работающей в ионизирующем излучении. Заготовки стекла в случае одностадийной технологии представляют собой булы дискообразной или цилиндрической формы, из которых затем методом механической обработки производятся оптические детали.

Двухстадийная технология производства стекла за счет дополнительной технологической операции осушки дает возможность получения кварцевого стекла с низким содержанием гидроксильных групп, что позволяет его использовать в качестве основного материала для оптических волокон. Кроме того, поскольку двухстадийная технология характеризуется тем, что на первой стадии образуется пористая заготовка, которая на второй стадии остекловывается, то возможно изготовление заготовок более сложной формы: труб и тиглей, делая синтетическое кварцевое стекло предпочтительным для изготовления тиглей, используемых при производстве ключевого материала микроэлектроники – кремния. Благодаря тому, что кварцевое стекло не взаимодействует с кислотами и другими реактивами, оно широко применяется в процессе производства чистых материалов (реакторы, ампулы и пр.) и в микроэлектронике (подложки фотошаблонов).

В качестве исходного сырья для газофазного производства синтетического кварцевого стекла имеется широкая вариативность. Наиболее широкое применение нашли тетрахлорид кремния (SiCl_4), тетроэтоксисилан $\text{Si}(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4$ и олигоорганосилаксаны $\text{D4}-(\text{CH}_3)_2\text{SiO})_5$ и $\text{D5}-(\text{CH}_3)_2\text{SiO})_5$. Они имеют принципиально разные исходные свойства, что налагает различия в используемом оборудовании и технологии их подготовки, но на выходе дающие одинаково хороший и стабильный результат.

Стекло типа КУ-1, первая группа, обычно производится методом гидролиза высокочистого тетрахлорида кремния в пламени кислородно-водородных горелок и характеризуется значительным содержанием гидроксильных групп, определяющих полосы поглощения стекла в инфракрасной области (рис. 6).

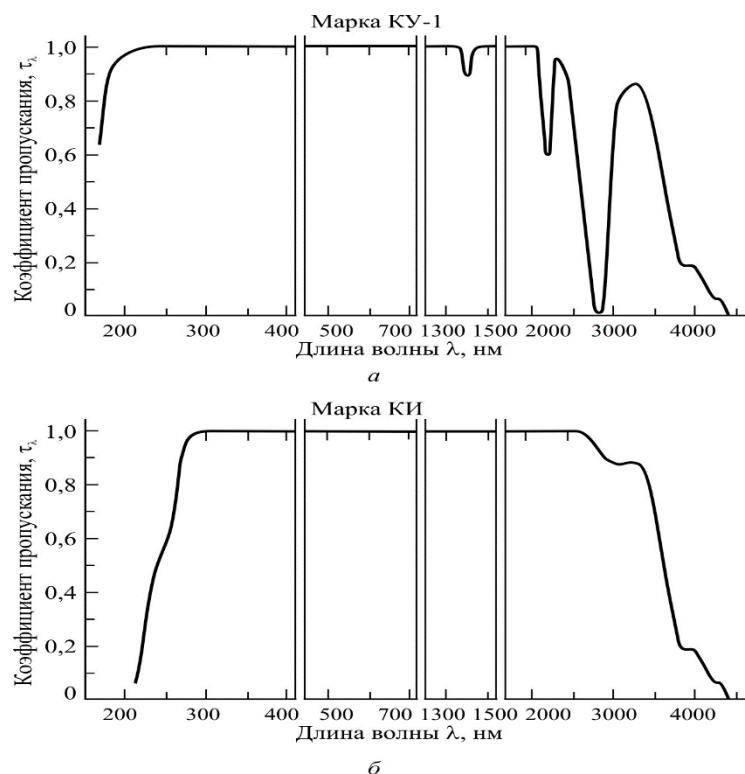
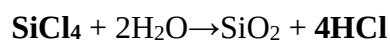


Рис. 6. Спектральные зависимости коэффициента пропускания кварцевых стекол КУ-1 (а), КИ (б)

Отсутствие полос поглощения в ультрафиолетовой области достигается за счет высокой степени очистки тетраоксида кремния, в котором примеси красящих металлов не превышают единиц ppb. К недостаткам технологии относят необходимость обращения на этапе производства стекла (SiO_2) с химически опасными веществами – тетрахлоридом кремния (SiCl_4) и хлористым газом (HCl):



Преимуществом тетрахлорида является его доступность, как попутного продукта при производстве поликремния или моносилана, а недостатком - его химическая опасность в исходном состоянии и отходов процесса производства кварца с его участием. Дальнейшее развитие эта технология получила с переходом на новый тип кремнийсодержащего вещества – кремнийорганические соединения. Из наиболее известных необходимо отметить упомянутые выше тетроэтоксисилан и олигоорганосилаксаны, отходом процесса пиролиза которых являются углекислый газ и вода, что существенно упрощает проектирование производств и снижает требования к их размещению. При этом следует отметить, что использование олигоорганосилаксанов предпочтительнее тетроэтоксисилана. Это обусловлено тем, что олигоорганосилаксаны инертны на всех этапах получения стекла, имеют более высокое содержание кремния, что определяет более высокую производительность и позволяет повысить эффективность процесса прямого наплава заготовки.

Стекло типа КУ-2 вторая группа, производится методом газопламенного наплава кварцевой крупки, полученной измельчением искусственных кристаллов, которые в свою очередь были получены гидротермальным методом в автоклавах при $t=400^{\circ}\text{C}$ и давлении 600–800 атм. На территории РФ в настоящий момент имеется промышленное производство искусственного кварца только по гидротермальной технологии (компания ООО «Синкрис» г. Гусь Хрустальный), в процессе которой выращиваются искусственные кристаллы, из которых впоследствии путём переплавки производят аморфное кварцевое стекло. Переплавка может производиться как газопламенным методом (в этом случае получается стекло с высоким содержанием гидроксильной группы), так и вакуумно-компрессионных печах (в этом случае получается стекло с высоким содержанием гидроксильной группы). Однако высокое (по отношению к стеклу, полученному газофазным способом) содержание металлов существенно ограничивает его применение. Наличие незначительных полос поглощения в УФ области обусловлено тем, что получить высокочистое сырьё гидротермальным методом не удастся. А полосы поглощения в ИК-области, обусловлены наличием гидроксильных групп, получаемых в пламени кислородно-водородной горелки.

Третья и пятая группы кварцевого стекла по ГОСТ 15130-86 производятся из минерального сырья, но по различным технологиям:

1. Стекло типа КВ производится газопламенным методом: в пламя водородно-кислородной горелки подаётся кварцевая крупка, она быстро оплавляется и капли расплава, попадая на подложку из кварцевого стекла и формируют блок наплавленного стекла.

Преимущества:

- можно получить заготовки из прозрачного кварцевого стекла больших размеров; - высокая производительность.

Недостатки:

- стекло имеет в своём составе гидроксильные группы ($\text{Si}^{4+} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Si}^{3+} - \text{OH}$) вследствие чего поглощают ИК излучение.

2. Стекло типа КИ производится методом электротермического плавления минеральной крупки в вакууме. Полосы поглощения в УФ области обусловлены недостаточной степенью обогащения минерального сырья, но при этом в стекле низкое содержание гидроксильных групп, что позволяет применять его в ИК-области спектра (рис.6, б).

3. Стекло пятой группы – КУВИ получается окислением тетрахлорида в факеле высокочастотной плазмы. Данное КС является наиболее чистым, так как помимо низкого содержания красящих примесей в нем практически отсутствуют гидроксильные группы, что делает возможным применение стекла в самом широком оптическом диапазоне. На первом этапе

внутри печи с постоянной скоростью подают кислород (O_2). В электрическом поле высокой частоты происходит ионизация и образуется плазма с $t=10000^\circ C$. В эту плазму подают смесь газов, в результате чего образуется SiO_2 , которая осаждается на подложки, формируя блок кварцевого стекла

Золь-гель технология производства стекла на основе тетрээтоксисилана является альтернативой двухстадийному производству кварцевого стекла с низким содержанием гидроксильных групп, но имеет существенно больше технологических переходов, на каждом из которых возможно внесение загрязнений, и поэтому, в настоящее время, не имеют широкого распространения в мировой практике. Тем не менее на территории РФ ведется опытно-лабораторное производство стекла КС-4В на основе золь-гель технологии, но с нестабильным результатом.

Необходимо констатировать, что технологии газофазного производства стекла с высоким содержанием гидроксидов (типа КУ-1) на территории РФ в настоящий момент практически утрачены, а с низким содержанием гидроксидов никогда и не были развиты. Поэтому наиважнейшей задачей является создание промышленного производства синтетического кварцевого стекла как по одностадийной, так и двухстадийной газофазной технологии. Это позволит закрыть потребности в стратегическом материала для микроэлектроники и обеспечить технологический суверенитет РФ.

Оптическое кварцевое стекло для волоконной оптики

В настоящее время одним из важнейших направлений применения высокочистого кварцевого стекла является волоконная оптика. Это связано с необходимостью формирования высокоскоростной волоконно-оптической связи нового поколения (5G, 6G) для гражданского и специального назначения, волоконных лазеров для широкого круга применений и ряд других направлений использования.

В Инжиниринговом центре волоконной оптики в Технопарке Мордовия планируется производство специальных волоконных световодов (ВС) (активных, анизотропных, ВС для рамановских усилителей и др.). Для производства таких световодов в мировой практике используются т.н. «преформы», изготавливаемые методами, основанными на химическом осаждении материала сердцевины из газовой фазы внутри опорной кварцевой трубки (методы MCVD рис. 7, FCVD и PCVD) или на наружную поверхность затравочного кварцевого стержня (метод OVD, рис. 8).

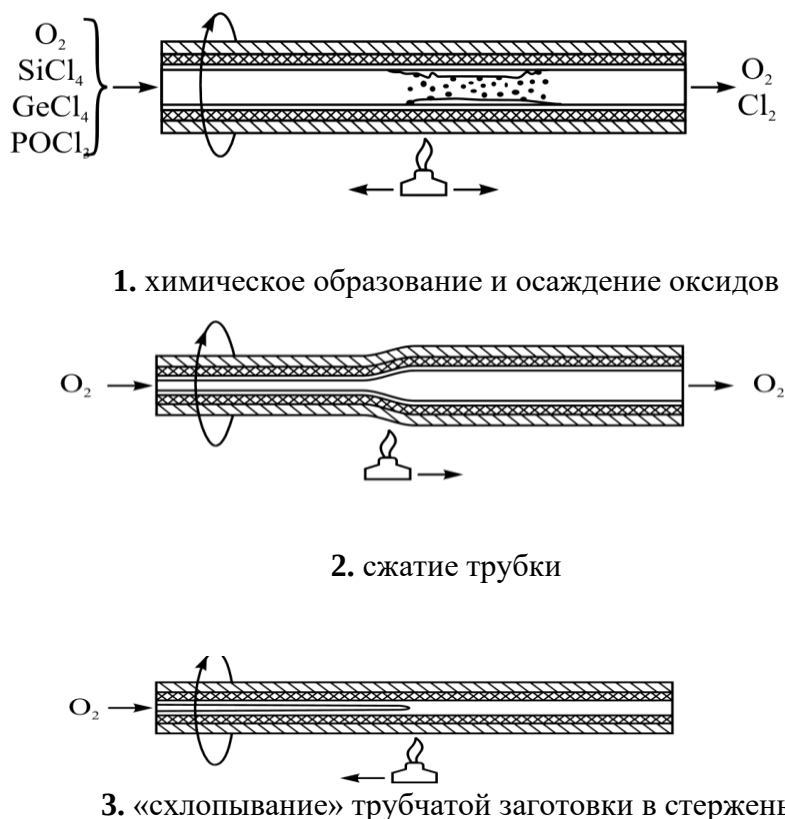


Рис. 7. Схема процесса получения заготовки методом MCVD

За рубежом эти методы используют фирмы Hitachi, Pirelli, Fujikura, Sumitomo, Nufern и многие другие. В России - ООО Научно-производственная компания «Оптолинк», ОАО Пермская научно-производственная компания, ОАО НТИОМ, НЦВО РАН, ФИРЭ РАН, ИХВВ РАН, Инжиниринговый центр Волоконной оптики, ИРЭ-Полус (IPG). В качестве исходных материалов используются высокочистые летучие соединения.

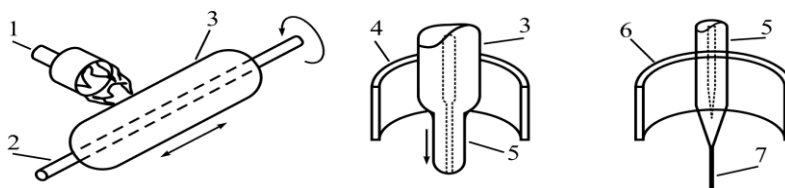


Рис. 8. Схема метода OVD. Образование и осаждение остекловывание вытяжка волокна оксидов пористой заготовки. 1 – кислородно-водородная горелка, 2 – затравочный штабик, 3 – пористая заготовка, 4 – печь остекловывания, 5 – остеклованная заготовка, 6 – высокотемпературная печь, 7 – волокно

Ключевым материалом в этих технологиях является наличие качественных калиброванных опорных кварцевых труб. Важнейшими характеристиками опорных кварцевых труб являются степень чистоты (содержание примесей) и геометрические параметры, которые определяют конечное качество световодов (оптические потери, геометрические и прочностные

характеристики). В таблице 5 приведено содержание примесей и оптические потери в материале труб, производимых фирмой Heraeus (Германия) и отечественных труб, изготавливаемых по различным технологиям.

Таблица 5. Содержание примесей и оптические потери в кварцевом стекле опорных труб различных типов

Тип трубы	Содержание примесей, мас. %						Оптические потери, Дб/км	
	Fe	Cr	Ni	Mn	Cu	ОН	0,85 мкм	1,55 мкм
I	2×10^{-4}	4×10^{-6}	5×10^{-5}	6×10^{-6}	5×10^{-5}	2×10^{-2}	1000	-
II	4×10^{-5}	3×10^{-6}	4×10^{-6}	2×10^{-6}	4×10^{-6}	4×10^{-2}	80	-
III	8×10^{-5}	5×10^{-6}	5×10^{-6}	1×10^{-6}	3×10^{-6}	2×10^{-4}	200	-
IV	2×10^{-5}	3×10^{-6}	$< 1 \times 10^{-6}$	1×10^{-6}	5×10^{-6}	2×10^{-2}	-	-
КУ-1	1×10^{-5}	$< 3 \times 10^{-6}$	3×10^{-6}	1×10^{-6}	5×10^{-6}	1×10^{-1}	< 10	-
F-300	$< 1 \times 10^{-7}$	$< 1 \times 10^{-7}$	-	-	$< 1 \times 10^{-7}$	$< 1 \times 10^{-4}$	< 3	< 1

Производимые в нашей стране опорные трубы не удовлетворяли требованиям волоконной оптики, особенно по геометрическим параметрам.

В таблице 6 приведены для сопоставления геометрические параметры труб, производимых ОАО «Кварцевое стекло» и Фирмой Heraeus (Германия). Параметры отечественных труб существенно ниже зарубежных.

Таблица 6. Геометрические характеристики кварцевых труб

Производитель	Внешний диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Овальность, мм	Стрела прогиба, мм/м
ОАО «Кварцевое стекло», (ТУ21-54598235-560- 2001г.)	20-25 ($\pm 0,5-0,6$)	2,0-4,0 ($\pm 0,3-0,6$)	0,3	4,0
	40-100	4,0-8,0 ($\pm 0,3-0,6$)	0,6	4,0
Фирма Heraeus (Германия)	20-50 ($\pm 0,1$)	1,5-4,0 ($\pm 0,1$)	0,08	0,3
	40-100	4,0-40 ($\pm 0,18$)	0,12	0,3

До последнего времени все отечественные производители волоконных световодов использовали опорные трубы фирмы Heraeus (Германия). Однако в связи с санкциями фирма отказывается продавать трубы для волоконной оптики соответствующего качества. Кроме того, трубы имеют высокую стоимость. В последнее время удается закупать кварцевые трубы китайского производства качества сравнимого с Heraeus, хотя китайские поставщики выставляют цены еще выше, чем у Heraeus и требуют выкупать минимальные партии труб определенного размера в три раза большего объема, чем ранее обуславливал Heraeus. Общая потребность в кварцевых трубах волоконного качества в Российской Федерации по нашим оценкам составляет 20000–25000 кг. В связи этим возникает проблема организации отечественного производства высококачественных кварцевых труб.

Трубы, как правило, изготавливаются (вытягиваются) методом перетяжки трубчатых блоков большого размера из высокочистого синтетического кварцевого стекла методом подobia.

Основной способ получения труб заключается в химическом осаждении стекла в пламени газовой горелки.

Процесс изготовления труб состоит из следующих стадий:

1. Получение пористого цилиндра осаждением стекла методом внешнего парофазного осаждения (OVD-процесс, рис. 8)
2. Высокотемпературная обработка в потоке хлора и гелия для удаления гидроксильных групп (осушка).
3. Проплавление пористого стекла в печи с получением прозрачной заготовки (остекловывание).
4. Высокотемпературный отжиг в потоке чистого азота для удаления остаточного гелия.
5. Высокоточная перетяжка блока в трубы заданного размера.

Очень ответственной стадией процесса получения труб является процесс перетяжки блоков в трубы с заданными геометрическими параметрами и полировка поверхности. Процесс проводится при высокой температуре методом подobia. Поэтому требуется строгий контроль параметров процесса. Высокоточное оборудование (башни вытяжки) в нашей стране не производится.

По имеющейся информации ООО «Кварцевые технологии» (Рязанская область, р.п. Шилово) и Акционерное общество «Южноуральский завод «Кристалл» обладают всем необходимым спектром технологий и оборудованием необходимым для производства оптического и стекольного кварца с требуемой примесной чистотой и пытались организовать производство кварцевых труб, (таблица 2). однако в ближайший год возможно закрытие ООО

«Кварцевые технологии» по экономическим причинам. В настоящее время единственной организацией в РФ, реально пытающейся решить проблему опорных кварцевых труб для применения в волоконной оптике, является ПАО ПНППК, которая выбрала другой метод золь-гель получения высокочистого кварцевого стекла для труб. В результате получена крупка (песок) из высокочистого кварцевого стекла, которую, в дальнейшем, нужно сплавить не загрязняя в большие стеклянные блоки-заготовки для дальнейшей перетяжки в трубы. Пока в организации идет отработка процесса.

В 2014–2019 годах правительством Мордовии продвигался проект под активным научным руководством академика Дианова Е. М. по организации производства кварцевых труб в Саранске на базе Технопарка «Мордовия» с участием НЦВО РАН и ИХВВ РАН. К сожалению, после кончины академика Дианова Е.М. эта активность прекратилась. В 2022–2023 годах по инициативе АО «Оптиковолокonné Системы» с участием НЦВО РАН и ИХВВ РАН готовился проект ФПИ, который затем преобразовался в Заявку на постановку приоритетной ОКР (ОТР) в Минпромторге РФ «Создание отечественной технологии производства кварцевых преформ, методик и средств измерения их контроля, с целью изготовления перспективных типов оптических волокон», шифр «Кварцит». Имеющийся в наличии у АО «Оптиковолокonné Системы» набор технологического оборудования, планировавшийся к установке в Технопарке «Мордовия» в рамках проекта, годится как для изготовления сердцевинных заготовок, так и при минимальной модификации для полного цикла изготовления высокочистых кварцевых труб. К сожалению, проект не запущен – АО «Оптиковолокonné Системы» сейчас сосредоточено на решении своей главной задачи – строительстве второй очереди завода по производству волокна.

На основании опыта совместных исследований НЦВО РАН и ИХВВ РАН были разработаны технические требования на трубы из высокочистого кварцевого стекла для волоконной оптики. Допустимые оптические потери в материале трубы не должны превышать 3,0 Дб/км, 2,0 Дб/км и <1 Дб/км на длинах волн 0,85 мкм, 1,06 мкм и 1,55 мкм, соответственно. Геометрические параметры и допуски должны быть близкими к параметрам труб фирмы Heraeus.

Подводя итоги данного раздела, можно констатировать, что в РФ промышленное производство опорных труб и прутков типа F300 и F320 (Heraeus) для изготовления заготовок оптического волокна (преформ) из материалов отечественного производства в настоящее время отсутствует. Частично сохранились технологии по одностадийной или двухстадийной наплавке с вытяжкой ребристых труб через формообразователь (поверхность загрязняется материалом формообразователя) в АО «Гусевский стекольный завод имени Ф. Э. Дзержинского» и в АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова». Кроме того, имеющиеся технологии позволяют получать трубы с высоким содержанием – ОН групп, т.к. применяются кислородно-водородные системы для

наплавки. Полное отсутствие технологии по промышленным методам сушки и фторирования типа VAD и OVD в РФ отсутствуют. Имеются только теоретические предположения без конкретной практической реализации.

Необходимы разработки технологических переделов производства калиброванных кварцевых труб и прутков из кварцевого стекла с параметрами по допускам типа изделий F300 и F320 (Heraus) и адаптация этих переделов в технологических линиях ряда предприятий при производстве преформ для оптических волокон.

Литература

1. Д. М. Лубенко, Д. М. Ежов, В. А. Светличный, Ю. М. Андреев, Н. А. Николаев Оптические свойства нелинейных кристаллов семейства боратов и их применение в источниках интенсивного терагерцового излучения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. – Т. 23, № 3. – С. 439–447
2. Д. М. Лубенко, В. Ф. Лосев, Д. М. Ежов, Ю. М. Андреев, Г. В. Ланский, А. А. Лисенко Генерация мощного ТГц излучения в ZnGeP₂ при фемтосекундной накачке излучением титан-сапфирового лазера // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2020. Т. 84, № 8. С. 1221–1224.
3. Н. А. Николаев, Г. В. Ланский, Ю. М. Андреев, Д. М. Ежов, М. Г. Креков, А. А. Лисенко Кристаллы β -ВВО, LBO и КТР как источники миллиметрового излучения // Известия высших учебных заведений. Физика. 2020. Т. 63, № 6 (750). С. 113–116.
4. Balasubramanian C., Bellucci S., Cinque G., Marcelli A., Guidi M. C., Piccinini M., Popov A., Soldatov A. Onorato P. 2006. Characterization of aluminium nitride nanostructures by XANES and FTIR spectroscopies with synchrotron radiation. J. Phys. Condens. Matter. 18(33): S2095.
5. Bathe R., Vispute R. D., Habersat D., Sharma R. P., Venkatesan T., Scozzie C. J., Ervin M., Geil B. R., Lelis A. J., Dikshit S. J., Bhattacharya R. 2001. AlN thin films deposited by pulsed laser ablation, sputtering and filtered arc techniques. Thin Sol. Films, 398-399: 575.
6. Beuhler, A., Wargowski, D., Kowalczyk, T., and Singer, K. (1993). Optical polyimides for single mode waveguides. SPIE – Optoelectronic Interconnects I 1849, 92;
7. Bert N. A., Bondarev A. D., Zolotarev V. V., Kirilenko D. A., Lubyanskiy Y. V., Lyutetskiy A. V., Slipchenko S. O., Petrunov A. N., Pikhtin N. A., Ayusheva K. R., Arsentyev I. N., Tarasov I. S. 2015. Properties of AlN films deposited by reactive ion-plasma sputtering. Semiconductors, 49: 1383.
8. Y. Q. Dong, Y. Yin, J. J. Huang, X. L. Zhang, Y. M. Andreev, D. M. Ezhov,
9. Dutta M., Koeck F. A. M., Li W., Nemanich R. J. and Chowdhury S. 2017. High Voltage Diodes in Diamond Using (100)- and (111)- Substrates. IEEE Electron Devices Lett. 38(5): 600-603.

10. Eldada, L., Beeson, K., Pant, D., Blomquist, R., Shacklette, L.W., and McFarland, M.J. (2000). Polymeric components for all-optical networks. Optoelectronic Integrated Circuits IV, San Jose, CA, SPIE.
11. Eldada L., Lawrence W. Shacklette. Advances in Polymer Integrated Optics. IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 6, NO. 1, JANUARY/FEBRUARY 2000, 54-58)
12. Felice V., Antoine P., Claudio T. 2019. Quad Flat No-lead package. Patent US, US2019131197 (A1).
13. Garcia-Mendez M., Morales-Rodriguez S., Galvan D. H., Machorro R. 2009. Characterization of AlN thin films fabricated by reactive DC sputtering: experimental measurements and Huckel calculations. Int. J. Mod. Phys. B. 23(9): 46 Baliga B. J. 2019. Wide Bandgap Semiconductor Power Devices: Materials, Physics, Design, and Applications, Woodhead Publishing-Elsevier Science, 600.33-2251.
14. S. G. Grechin Optimization on the frequency conversion of LiGaS₂ crystal // Laser Physics. – 2019. – Vol. 29, № 9.
15. Hashimoto A., Koiwa I. Low- κ Materials and Development Trends. 2009. In: Shacham-Diamand Y., Osaka T., Datta M., Ohba T. (eds) Advanced Nanoscale ULSI Interconnects: Fundamentals and Applications. Springer, New York, NY, 145-151.
16. Ho C. J., Shing T. K., Li P. C. 2004. Preferred orientation control and characterization of AlN thin films using reactive sputtering. Tamkang Journal of Science and Engineering. 7(1): 14.
17. Kang Y. H., Hu H. Y., Han B. G., Su H. 2019. A reconfigurable solid-state plasma dipole antenna based on SPiN diodes. Microelectronic Engineering. 214: 55-59.
18. Khan S., Shahid M., Mahmood A., Shah A., Ahmed I., Mehmood M., Aziz U., Raza Q., Alam M. 2015. Texture of the nano-crystalline AlN thin films and the growth conditions in DC magnetron sputtering. Nat. Sci. Mater. Int., 25(4): 282-290.
19. Kim Jae-Keun, Jeong Sang-hun. 2001. Effects of deposition parameters on AlN film growth using reactive DC magnetron sputtering. J. Korean Phys. Soc. 38(1): 19-24.
20. Kimoto T., Cooper J. A. 2014. Fundamentals of Silicon Carbide Technology. Growth, Characterization, Devices, and Applications. New York: Wiley-IEEE Press, 555.
21. Kimoto T., Yonezawa Y. 2018. Current status and perspectives of ultrahigh-voltage SiC power devices. Materials Science in Semiconductor Processing. 78: 43-56.
22. Kobayashi J., Tohru Matsuura, Shigekuni Sasaki, and Tohru Maruno. Single-mode optical waveguides fabricated from fluorinated polyimides. APPLIED OPTICS. Vol. 37, No. 6, 1998, 1031-1037;

23. Kurokawa, T., Takato, N., and Katayama, Y. (1980). Polymer optical circuits for multimode optical fiber systems Appl. Opt. 19, 3124.
24. Kumari N., Singh A. K., Barhai P. K. 2014. Study of Properties of AlN Thin Films Deposited by Reactive Magnetron Sputtering Int. J. Thin Films Sci. Technol. 3(2): 43-49.
25. Lawrence S. Pan, Don R. Kania. 1995. Diamond: Electronic Properties and Applications. Boston-Kluwer Academic Publishers, Springer. 472.
26. Liu J.W., Oosato H., Liao M. Y. and Koide Y. 2017. Enhancement-mode hydrogenated diamond metal-oxidesemiconductor field-effect transistors with Y2O3 oxide insulator grown by electron beam evaporator. Appl. Phys. Lett. 110(20): 203502-1-203502-5.
27. Losch, K.H., Kersten, P., and Wischmann, W. (1992). Polymeric integrated optics. Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 244, 253–262.
28. Low loss passive polymer optical waveguides with high environmental stability. J. Lightwave Technol. 14, 2338–2343.
29. Lu D., Wong C.P. 2017. Materials for Advanced Packaging. Springer International Publishing Switzerland. 969.
30. OhSeunghoon. QFN manufacturing method of QFN semiconductor package. Patent KR, No. KR20190094983 (A), 2019.
31. Persans P. D. and F. Huang, N. Agarwal, S. Ponoth and J.L. Plawsky Dielectric materials in optical waveguide applications. P.359
32. Ponoth, S.S., Agarwal, N.T., Persans, P.D., and Plawsky, J.L. (2001). PECVD silicon oxide – xerogel and polymer-xerogel waveguides. Proc. Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 637.
33. Reuter, R. (1988). Appl. Opt. 27, 4565.
34. Schrieffer, R. (1985). Optical waveguiding in doped poly(methyl methacrylate). Polymer 26, 1423.
35. Seokmo Hong, Chang-Seok Lee, Min-Hyun Lee et al. 2020. Ultralow-dielectric-constant amorphous boron nitride. Nature, 582: 511-514
36. Ulrich, R. and Weber, H.P. (1972). Optical properties of polyurethane. Appl. Opt. 11, 428.
37. Usui, M., Hikita, M., Watanabe, T., Amano, M., Suguwara, S., Hayashida, S., and Imamura, S. (1996).
38. Zhang J. X., Cheng H., Chen Y. Z., Uddin A., Yuan S., Geng S. J., Zhang S. 2005. Growth of AlN Films on Si(100) and Si(111) Substrates by Reactive Magnetron Sputtering. Surf. Coat. Technol. 198(1-3): 68-73.
39. Zhang Ziyue; Huang Zhengxin, Liu Jiabin. SOT-23 packaging structure. Patent CN, CN203644753 (U), 2014.

40. Recommendations for Board Assembly of Infineon Discrete Quad-Flat No-Lead Packages, Infineon TechnologiesAG, edition 2018-09-19, Munich, Germany https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Board_Assembly_of_Disc-rete_Quad_Flat_No_Lead_Packages-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462677d0f46016783ff4d1f7edf.
41. <https://www.interfax.ru/business/450586>; <http://atomicexpert.com/page785032.html>.

SYSTEMIC VIEW ON THE STATE OF MATERIALS SUPPLY FOR ELECTRONIC MANUFACTURING IN THE RUSSIAN FEDERATION.

PART 2

Levonovich B. N. JSC «ISTC MIET»

levbn2008@yandex.ru

Abstract. The second part of the analytical review provides a systematic examination of the current state and key challenges in supplying domestic electronic manufacturing with materials under sanctions restrictions.

Global and Russian production of key radio electronic materials is examined in detail, including laser single crystals based on YAG (yttrium aluminium garnet) doped with Nd, Er, Yb, Ce, Cr, Tm, Ho, quartz, and others. Data are provided on market volumes, technological levels, major manufacturers, and existing domestic developments.

Proposals are formulated to focus efforts on critically important groups of materials, develop comprehensive (end to end) projects, strengthen coordination between equipment and materials developers, and enhance cooperation with the Republic of Belarus.

The review is intended for specialists in electronic materials science, developers of electronic component base (ECB), and decision makers in industrial policy.

Keywords: electronic component base (ECB), import substitution, microelectronics materials, semiconductor single crystals, silicon, gallium arsenide, silicon carbide, gallium nitride, germanium, wide bandgap semiconductors, sanctions restrictions, federal targeted programs, technological independence, alternatives analysis, wafer production, power electronics, optoelectronics, microwave (RF) electronics.

References

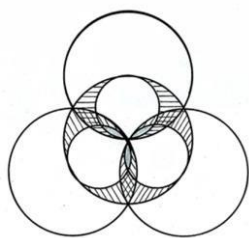
1. Lubenko D. M., Ezhov D. M., Svetlichnyi V. A., Andreev Yu. M., Nikolaev N. A. Optical Properties of Nonlinear Crystals of the Borate Family and Their Application in Intense Terahertz Radiation Sources // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2023. Vol. 23, No. 3. P. 439–447.

2. Lubenko D. M., Losev V. F., Ezhov D. M., Andreev Yu. M., Lansky G. V., Lisenko A. A. Generation of High-Power Terahertz Radiation in ZnGeP₂ Using Femtosecond Pumping with Titanium–Sapphire Laser Radiation // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2020. Vol. 84, No. 8. P. 1221–1224.
3. Nikolaev N. A., Lansky G. V., Andreev Yu. M., Ezhov D. M., Krekov M. G., Lisenko A. A. β -BBO, LBO, and KTP Crystals as Sources of Millimeter-Wave Radiation // Russian Physics Journal. 2020. Vol. 63, No. 6 (750). P. 113–116.
4. Balasubramanian C., Bellucci S., Cinque G., Marcelli A., Guidi M. C., Piccinini M., Popov A., Soldatov A. Onorato P. 2006. Characterization of aluminium nitride nanostructures by XANES and FTIR spectroscopies with synchrotron radiation. J. Phys. Condens. Matter. 18(33): S2095.
5. Bathe R., Vispute R. D., Habersat D., Sharma R. P., Venkatesan T., Scozzie C. J., Ervin M., Geil B. R., Lelis A. J., Dikshit S. J., Bhattacharya R. 2001. AlN thin films deposited by pulsed laser ablation, sputtering and filtered arc techniques. Thin Sol. Films, 398-399: 575.
6. Beuhler, A., Wargowski, D., Kowalczyk, T., and Singer, K. (1993). Optical polyimides for single mode waveguides. SPIE – Optoelectronic Interconnects I 1849, 92;
7. Bert N. A., Bondarev A. D., Zolotarev V. V., Kirilenko D. A., Lubyanskiy Y. V., Lyutetskiy A. V., Slipchenko S. O., Petrunov A. N., Pikhtin N. A., Ayusheva K. R., Arsentyev I. N., Tarasov I. S. 2015. Properties of AlN films deposited by reactive ion-plasma sputtering. Semiconductors, 49: 1383.
8. Y. Q. Dong, Y. Yin, J. J. Huang, X. L. Zhang, Y. M. Andreev, D. M. Ezhov,
9. Dutta M., Koeck F. A. M., Li W., Nemanich R. J. and Chowdhury S. 2017. High Voltage Diodes in Diamond Using (100)- and (111)- Substrates. IEEE Electron Devices Lett. 38(5): 600-603.
10. Eldada, L., Beeson, K., Pant, D., Blomquist, R., Shacklette, L.W., and McFarland, M.J. (2000). Polymeric components for all-optical networks. Optoelectronic Integrated Circuits IV, San Jose, CA, SPIE.
11. Eldada L., Lawrence W. Shacklette. Advances in Polymer Integrated Optics. IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 6, NO. 1, JANUARY/FEBRUARY 2000, 54-58)
12. Felice V., Antoine P., Claudio T. 2019. Quad Flat No-lead package. Patent US, US2019131197 (A1).
13. Garcia-Mendez M., Morales-Rodriguez S., Galvan D. H., Machorro R. 2009. Characterization of AlN thin films fabricated by reactive DC sputtering: experimental measurements and Huckel calculations. Int. J. Mod. Phys. B. 23(9): 46 Baliga B. J. 2019. Wide Bandgap Semiconductor Power Devices: Materials, Physics, Design, and Applications, Woodhead Publishing-Elsevier Science, 600.33-2251.

14. S. G. Grechin Optimization on the frequency conversion of LiGaS₂ crystal // Laser Physics. – 2019. – Vol. 29, № 9.
15. Hashimoto A., Koiwa I. Low- κ Materials and Development Trends. 2009. In: Shacham-Diamand Y., Osaka T., Datta M., Ohba T. (eds) Advanced Nanoscale ULSI Interconnects: Fundamentals and Applications. Springer, New York, NY, 145-151.
16. Ho C. J., Shing T. K., Li P. C. 2004. Preferred orientation control and characterization of AlN thin films using reactive sputtering. Tamkang Journal of Science and Engineering. 7(1): 14.
17. Kang Y. H., Hu H. Y., Han B. G., Su H. 2019. A reconfigurable solid-state plasma dipole antenna based on SPiN diodes. Microelectronic Engineering. 214: 55-59.
18. Khan S., Shahid M., Mahmood A., Shah A., Ahmed I., Mehmood M., Aziz U., Raza Q., Alam M. 2015. Texture of the nano-crystalline AlN thin films and the growth conditions in DC magnetron sputtering. Nat. Sci. Mater. Int., 25(4): 282-290.
19. Kim Jae-Keun, Jeong Sang-hun. 2001. Effects of deposition parameters on AlN film growth using reactive DC magnetron sputtering. J. Korean Phys. Soc. 38(1): 19-24.
20. Kimoto T., Cooper J. A. 2014. Fundamentals of Silicon Carbide Technology. Growth, Characterization, Devices, and Applications. New York: Wiley-IEEE Press, 555.
21. Kimoto T., Yonezawa Y. 2018. Current status and perspectives of ultrahigh-voltage SiC power devices. Materials Science in Semiconductor Processing. 78: 43-56.
22. Kobayashi J., Tohru Matsuura, Shigekuni Sasaki, and Tohru Maruno. Single-mode optical waveguides fabricated from fluorinated polyimides. APPLIED OPTICS. Vol. 37, No. 6, 1998, 1031-1037;
23. Kurokawa, T., Takato, N., and Katayama, Y. (1980). Polymer optical circuits for multimode optical fiber systems Appl. Opt. 19, 3124.
24. Kumari N., Singh A. K., Barhai P. K. 2014. Study of Properties of AlN Thin Films Deposited by Reactive Magnetron Sputtering Int. J. Thin Films Sci. Technol. 3(2): 43-49.
25. Lawrence S. Pan, Don R. Kania. 1995. Diamond: Electronic Properties and Applications. Boston-Kluwer Academic Publishers, Springer. 472.
26. Liu J.W., Oosato H., Liao M. Y. and Koide Y. 2017. Enhancement-mode hydrogenated diamond metal-oxide semiconductor field-effect transistors with Y₂O₃ oxide insulator grown by electron beam evaporator. Appl. Phys. Lett. 110(20): 203502-1-203502-5.
27. Losch, K.H., Kersten, P., and Wischmann, W. (1992). Polymeric integrated optics. Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 244, 253–262.
28. Low loss passive polymer optical waveguides with high environmental stability. J. Lightwave Technol. 14, 2338–2343.

29. Lu D., Wong C.P. 2017. Materials for Advanced Packaging. Springer International Publishing Switzerland.969.
30. OhSeunghoon.QFNmanufacturing method ofQFNsemiconductor package. Patent KR, No. KR20190094983 (A), 2019.
31. Persans P. D. and F. Huang, N. Agarwal, S. Ponoth and J.L. Plawsky Dielectric materials in optical waveguide applications. P.359
32. Ponoth, S.S., Agarwal, N.T., Persans, P.D., and Plawsky, J.L. (2001). PECVD silicon oxide – xerogel and polymer-xerogel waveguides. Proc. Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 637.
33. Reuter, R. (1988). Appl. Opt. 27, 4565.
34. Schrieffer, R. (1985). Optical waveguiding in doped poly(methyl methacrylate). Polymer 26, 1423.
35. Seokmo Hong, Chang-Seok Lee, Min-Hyun Lee et al. 2020. Ultralow-dielectric-constant amorphous boron nitride. Nature, 582: 511-514
36. Ulrich, R. and Weber, H.P. (1972). Optical properties of polyurethane. Appl. Opt. 11, 428.
37. Usui, M., Hikita, M., Watanabe, T., Amano, M., Suguwara, S., Hayashida, S., and Imamura, S. (1996).
38. Zhang J. X., Cheng H., Chen Y. Z., Uddin A., Yuan S., Geng S. J., Zhang S. 2005. Growth of AlN Films on Si(100) and Si(111) Substrates by Reactive Magnetron Sputtering. Surf. Coat. Technol. 198(1-3): 68-73.
39. Zhang Ziyue; Huang Zhengxin, Liu Jiabin. SOT-23 packaging structure. Patent CN, CN203644753 (U), 2014.
40. Recommendations for Board Assembly of Infineon Discrete Quad-Flat No-Lead Packages, Infineon TechnologiesAG,edition 2018-09-19, Munich, Germany https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Board_Assembly_of_Disc-rete_Quad_Flat_No_Lead_Packages-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462677d0f46016783ff4d1f7edf.
41. <https://www.interfax.ru/business/450586>; <http://atomicexpert.com/page785032.html>.

УДК 005.21



СТРАТЕГИЧЕСКИЙ МЕНЕДЖМЕНТ: ЭВОЛЮЦИЯ ПАРАДИГМЫ В XXI ВЕКЕ

Желтков М. А. (независимый исследователь)

Аннотация. В статье исследуется эволюция стратегического менеджмента от классических концепций И. Ансоффа до современных подходов, обусловленных цифровой трансформацией, глобальной нестабильностью и ESG-императивами. Показано, что фундаментальные идеи Ансоффа (матрица «продукт–рынок», слабые сигналы, социальная инерция) сохраняют актуальность, но требуют переосмысления в условиях турбулентности XXI века. Выделены три ключевых вектора развития: цифровая трансформация (data-driven решения, искусственный интеллект, сценарное планирование), устойчивое развитие (интеграция ESG-принципов, гибридные организации) и agile-менеджмент (итеративные стратегии, организационная гибкость). Рассмотрены платформенные бизнес-модели и концепция динамических способностей. Определены «неприрученные проблемы» современного стратегического управления и перспективные направления исследований, включая роль ИИ в принятии решений, микрооснования динамических способностей и экосистемную стратегию.

Ключевые слова: стратегический менеджмент, Игорь Ансофф, цифровая трансформация, ESG, agile-менеджмент, динамические способности, платформенные бизнес-модели, устойчивое развитие, турбулентность.

Введение

Стратегический менеджмент как область знания и практического управления имеет богатую историю развития. Его эволюция начинается с интуитивных представлений о корпоративной стратегии в середине XX века и продолжается до сегодняшнего дня, когда дисциплина представляет собой сложную систему концепций, моделей и инструментов. Последняя четверть прошлого века стала временем становления стратегического менеджмента как самостоятельной дисциплины [1], а XXI век принёс новые вызовы – цифровую трансформацию, глобальную нестабильность, экологические и социальные императивы, – которые заставляют пересматривать фундаментальные основы дисциплины.

Цель данной статьи – глубоко и всесторонне исследовать эволюцию стратегического менеджмента от классических теорий И. Ансоффа до современных подходов, формирующихся

под влиянием новых реалий. В работе анализируются ключевые концептуальные сдвиги, основные тенденции развития и перспективные направления дальнейших исследований.

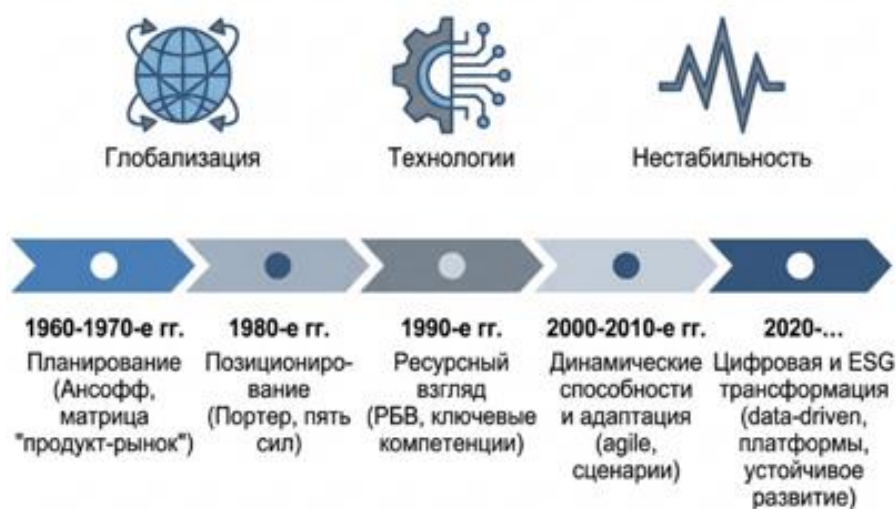


Рис. 1. Эволюция парадигм стратегического менеджмента (1960–2020-е гг.)

1. Фундаментальные основы: наследие И. Ансоффа

1.1. Классическая теория стратегического менеджмента

Игорь Ансофф, по праву считающийся «отцом стратегического менеджмента», создал теоретическую базу, определившую развитие этой дисциплины на многие десятилетия. Его книга «Стратегический менеджмент» (1979) стала ключевым событием, закрепив за Ансоффом статус основоположника современной стратегической мысли [1]. Центральная идея Ансоффа заключалась в изучении поведения организаций в турбулентных, нестабильных условиях. Он указывал, что большинство теорий его времени опирались на усреднённые характеристики организаций, игнорируя крайности, которые определяют как провалы, так и успехи [1, с. 12]. Этот подход стал предвестником ситуационного анализа и теории контингенции.

Сравнивая свой вклад с достижениями Ньютона в физике, Ансофф заложил основы «физики управления». Он ввёл понятие социальной инерции, где ключевым фактором является скорость стратегического изменения [2]. Эта идея остаётся актуальной и сегодня: преодоление внутреннего сопротивления изменениям – одна из центральных проблем стратегического менеджмента.

1.2. Ключевые концепции и их непреходящая ценность

Первая ключевая концепция – матрица «продукт–рынок» (матрица Ансоффа) – позволяет анализировать возможности роста компании через соотношение существующих и новых продуктов и рынков, выделяя четыре стратегии: проникновение на рынок, развитие рынка, развитие продукта и диверсификацию [2]. Этот инструмент, несмотря на свою простоту, до сих

пор используется для базового анализа стратегических возможностей.

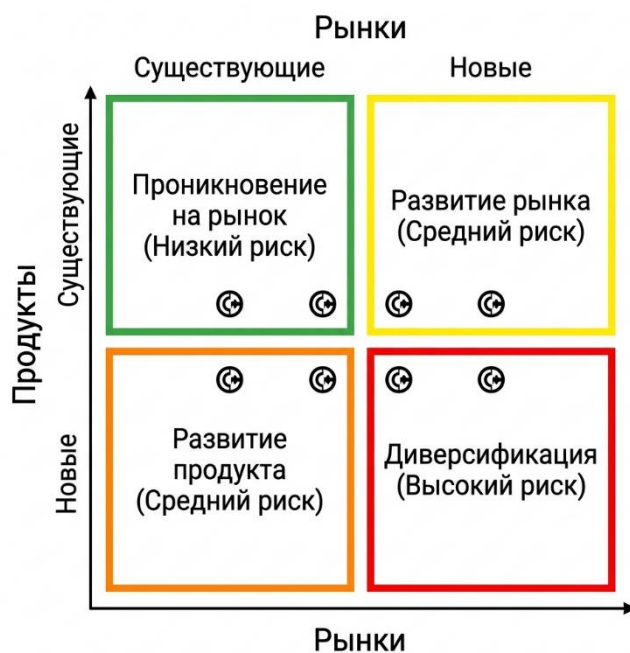


Рис. 2. Матрица Ансоффа «продукт–рынок» с указанием уровня риска

Вторая важная концепция – идея турбулентной среды и необходимость многофакторного стратегического планирования. Ансофф подчёркивал, что стратегия должна учитывать компетенции руководства, внутренний климат, структуры власти и организационные особенности [1].

Современные исследования подтверждают актуальность идей Ансоффа. Анализ публикаций 1965–2024 годов показывает, что такие концепции, как матрица Ансоффа, анализ слабых сигналов и стратегические векторы, продолжают формировать стратегическое мышление [20]. Более того, гипотеза стратегического успеха Ансоффа дополняет современные диагностические фреймворки [5].

2. Парадигмальный сдвиг: стратегический менеджмент в XXI веке

2.1. От стабильности к турбулентности: новый контекст

XXI век радикально изменил условия стратегического управления. Если в период формирования классических теорий деловая среда была относительно стабильной, то сегодня она характеризуется беспрецедентной неопределённостью, волатильностью и сложностью [11]. Пандемия COVID-19, геополитические конфликты, ускоренные технологические изменения сделали традиционные подходы к стратегическому планированию, основанные на долгосрочных линейных прогнозах, практически неприменимыми.

Современные исследования выделяют три основных направления трансформации стратегического менеджмента в XXI веке [21]. Ключевые изменения параметров стратегического управления представлены в таблице 1.

Таблица 1. Трансформация параметров стратегического управления. Источник: составлено автором на основе (6).

Параметр	Традиционный подход	Подход в цифровой среде
Планирование	Долгосрочное, линейное	Краткосрочное, гибкое
Источники информации	Экспертное мнение	Данные и аналитика (data-driven)
Принятие решений	Централизованное	Распределённое, гибкое
Организационная модель	Линейная, иерархическая	Платформенная, сетевая
Инновационная деятельность	Эпизодическая	Непрерывная

3. Три ключевых вектора современного развития

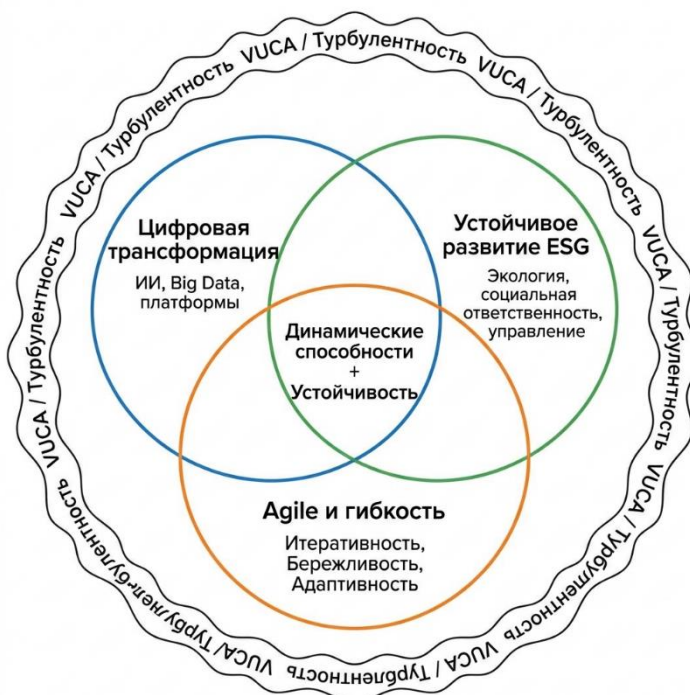


Рис. 3. Триада ключевых векторов стратегического менеджмента XXI века

3.1. Цифровая трансформация как стратегический императив

Цифровая трансформация стала мощнейшим драйвером изменений. Цифровизация меняет возможности стратегического управления через развитие информационной аналитики, искусственного интеллекта и цифровых платформ [21]. Современные исследования подчёркивают переход от интуитивно-экспертных методов к data-driven принятию решений. Системы поддержки на базе ИИ анализируют огромные массивы данных, выявляя паттерны,

невидимые для человеческого анализа [13]. При этом ИИ не заменяет менеджеров, а переопределяет саму суть управления: наиболее успешные менеджеры – те, кто эффективно сотрудничает с ИИ-системами.

В условиях усиления рыночной волатильности и геополитической неопределённости традиционные методы стратегического планирования оказываются неэффективными. Альтернативой выступают сценарное планирование, гибкие подходы на уровне корпоративной стратегии и создание «цифровых двойников» [16].

3.2. Устойчивое развитие: ESG как новая стратегическая парадигма

Интеграция принципов устойчивого развития и ESG (Environmental, Social, Governance) в корпоративную стратегию представляет собой фундаментальное переосмысление целей и критериев эффективности бизнеса [4]. Слияние стратегического менеджмента и устойчивого развития отражает растущее признание необходимости долгосрочного создания ценности, учитывающей экологические, социальные и управленческие аспекты.

Крупные производственные компании (Unilever, Nestlé) ставят цели по снижению углеродного следа, рассматривая это как инвестиции в будущую устойчивость [19]. Возникает концепция гибридных организаций (например, Patagonia), сочетающих экономические цели с социальной и экологической ценностью. ESG-принципы становятся неотъемлемой частью стратегического управления: инвесторы всё чаще оценивают компании по ESG-критериям, что делает устойчивое развитие фактором конкурентоспособности.

3.3. Agile-менеджмент и организационная гибкость

Agile-менеджмент, изначально появившийся в IT-разработке, сегодня проникает в стратегическое управление, становясь философией, охватывающей всю организацию [3]. Это итеративный подход к планированию, быстрые циклы обратной связи и способность адаптироваться через эксперименты. В стратегическом контексте agile означает переход от жёстких долгосрочных планов к динамическим стратегиям.

Современные исследования предлагают синтез agile с методологиями Lean и Kaizen, создавая основу для построения адаптивных и устойчивых организаций [14]. Эксперты прогнозируют, что к 2026 году бизнес-лидерам потребуется ещё большая гибкость и системное мышление [9].

4. Цифровая трансформация стратегического планирования

4.1. От долгосрочного планирования к динамическим стратегиям

Традиционное стратегическое планирование на 5–10 лет с линейной экстраполяцией показывает несостоятельность в условиях современной неопределённости. Ключевой тренд – переход от планирования как разового акта к непрерывному процессу адаптации [16]. Сценарное

планирование позволяет моделировать несколько вариантов будущего. Цифровые технологии, включая искусственный интеллект и большие данные, автоматизируют мониторинг внешней среды. Перспективы до 2030 года указывают на дальнейшее усиление роли динамических стратегий [6].



Рис. 4. Переход от долгосрочного планирования к динамической стратегии

4.2. Слабые сигналы и стратегическая разведка

Концепция слабых сигналов (weak signals), предложенная Ансоффом, обретает новое значение в цифровую эпоху. Слабые сигналы – ранние индикаторы изменений, которые могут сигнализировать о значительных будущих трендах [2]. В условиях информационного изобилия цифровые инструменты (ИИ-аналитика, мониторинг соцсетей) позволяют выявлять зарождающиеся тренды, но избыток информации создаёт риск перегрузки. Требуется разработка организационных фильтров и процедур для выделения значимых сигналов [10].

5. Стратегические инновации и новые бизнес-модели

5.1. Стратегия голубого океана

Стратегия голубого океана (Kim & Mauborgne, 2005) предлагает создание нового рыночного пространства, свободного от конкуренции, вместо борьбы в насыщенных «красных океанах» [8]. Несмотря на критику (ограничения применимости, нечёткость имплементации), сама идея создания бесконкурентного рыночного пространства оказала значительное влияние на стратегическое мышление.

5.2. Динамические способности

Концепция динамических способностей (Теесе и др.) определяет способность фирмы создавать, находить и использовать возможности, а также реконфигурировать ресурсную базу в ответ на рыночные и геополитические условия [17]. В XXI веке глобальные вызовы – от экологических угроз до технологических прорывов – требуют развития динамических способностей как механизма поддержания устойчивых инноваций.

5.3. Платформенные бизнес-модели

Цифровые платформы и экосистемы (Amazon, Uber, Airbnb) фундаментально изменили логику стратегического управления. Платформенные модели выигрывают от сильных сетевых эффектов, низких предельных издержек и доступа к большим данным [12]. Однако они сопряжены с вызовами: управление сетевыми эффектами, регуляторные ограничения, интенсивная конкуренция с эффектом «победитель получает всё». Переход от линейных организационных моделей к платформенным представляет одну из самых значимых трансформаций в современном стратегическом менеджменте [7].

6. Вызовы и перспективы развития стратегического менеджмента

6.1. «Неприрученные проблемы» современной стратегии

Исследование среди директоров по стратегии выявило «неприрученные проблемы» (wicked problems), для которых нет готовых решений [15]:

- деглобализация и экономическая нестабильность;
- политические и военные кризисы;
- быстрое развитие ИИ и информационных технологий;
- комплексность и интенсивность проблем (пандемии, климатические кризисы).

Эти проблемы требуют междисциплинарного подхода и выхода за рамки существующих моделей (SWOT, пяти сил Портера).



Рис. 5. «Неприрученные проблемы» и направления дальнейших исследований в стратегическом менеджменте

6.2. Направления дальнейших исследований

Анализ трендов позволяет выделить перспективные направления [18]:

1. Искусственный интеллект в стратегическом принятии решений – как ИИ меняет процессы анализа и выбора, границы между машинной логикой и человеческой креативностью [13].
2. Микрооснования динамических способностей – конкретные организационные рутины сенсинга, сизинга и трансформации в разных контекстах.
3. Устойчивость как стратегический ресурс – концепция антихрупкости (Талеб) и встраивание resilience в стратегическое планирование.
4. Экосистемная стратегия – управление распределением ценности в условиях проницаемых границ организаций.
5. Стратегическая роль данных и алгоритмов – данные как новый стратегический ресурс и источник конкурентного преимущества.

Заключение

Стратегический менеджмент в XXI веке переживает глубокую трансформацию. Фундаментальные идеи Ансоффа остаются актуальными, но требуют адаптации. Если классический подход был ориентирован на анализ стабильных отраслевых структур, то сегодня акцент смещается на управление неопределённостью, создание способности к непрерывной адаптации и формирование новых конфигураций ценности. Три магистральных вектора – цифровая трансформация, устойчивое развитие и agile-гибкость – взаимно усиливают друг друга. Наследие Ансоффа, с его акцентом на турбулентную среду и важность крайностей, оказывается удивительно созвучным современным вызовам. Дальнейшее развитие дисциплины будет двигаться в направлении интеграции с теорией сложных систем, поведенческой экономикой и когнитивной психологией.

Литература

1. Ансофф И. Стратегический менеджмент. Классическое издание. – СПб.: Питер, 2011. – 344 с.
2. Ansoff H.I. Corporate Strategy: An Analytic Approach to Business Policy for Growth and Expansion. – New York: McGraw Hill, 1965. – 241 p.
3. Denning S. How major corporations are making sense of Agile // Strategy & Leadership. – 2018. – Vol. 46(1). – P. 3–9.

4. Eccles R.G., Ioannou I., Serafeim G. The impact of corporate sustainability on organizational processes and performance // *Management Science*. – 2014. – Vol. 60(11). – P. 2835–2857.
5. Grant R.M. *Contemporary Strategy Analysis*. 10th ed. – Wiley, 2019. – 656 p.
6. Hoskisson R.E., Hitt M.A., Ireland R.D. *Competing for advantage*. 4th ed. – Cengage Learning, 2017. – 480 p.
7. Jacobides M.G., Cennamo C., Gawer A. Towards a theory of ecosystems // *Strategic Management Journal*. – 2018. – Vol. 39(8). – P. 2255–2276.
8. Kim W.C., Mauborgne R. *Blue Ocean Strategy: How to Create Uncontested Market Space and Make the Competition Irrelevant*. – Harvard Business Review Press, 2005. – 240 p.
9. McKinsey & Company. *Agile strategy: From planning to doing*. – 2025. – URL: [гипотетический источник].
10. Mendonça S., Cardoso G. The weak signals of the future: A sensemaking perspective // *Futures*. – 2023. – Vol. 150. – P. 103–116.
11. Millar C.C.J.M., Groth O., Mahon J.F. Management innovation in a VUCA world: Challenges and recommendations // *California Management Review*. – 2018. – Vol. 61(1). – P. 5–14.
12. Parker G.G., Van Alstyne M.W., Choudary S.P. *Platform Revolution: How Networked Markets Are Transforming the Economy and How to Make Them Work for You*. – W.W. Norton & Company, 2016. – 352 p.
13. Raisch S., Krakowski S. Artificial intelligence and management: The automation–augmentation paradox // *Academy of Management Review*. – 2021. – Vol. 46(1). – P. 192–210.
14. Rigby D.K., Sutherland J., Takeuchi H. Embracing Agile // *Harvard Business Review*. – 2016. – Vol. 94(5). – P. 40–50.
15. Rittel H.W.J., Webber M.M. Dilemmas in a general theory of planning // *Policy Sciences*. – 1973. – Vol. 4(2). – P. 155–169.
16. Schoemaker P.J.H., Heaton S., Teece D. Innovation, dynamic capabilities, and leadership // *California Management Review*. – 2018. – Vol. 61(1). – P. 15–42.
17. Teece D.J. Dynamic capabilities and (digital) business models // *Strategic Management Review*. – 2023. – Vol. 4(1). – P. 1–40.
18. Teece D.J. Explicating dynamic capabilities: The nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance // *Strategic Management Journal*. – 2007. – Vol. 28(13). – P. 1319–1350.
19. Unilever. *Sustainable Living Plan. Annual Report 2023*. – London, 2024.

20. Vecchiato R. Strategic foresight and corporate strategy: A review and future research directions // *Technological Forecasting and Social Change*. – 2024. – Vol. 198. – P. 123–135.

21. Verhoef P.C., Broekhuizen T., Bart Y. et al. Digital transformation: A multidisciplinary reflection and research agenda // *Journal of Business Research*. – 2021. – Vol. 122. – P. 889– 901.

STRATEGIC MANAGEMENT: EVOLUTION OF THE PARADIGM IN THE 21ST CENTURY

Zheltkov M. A. (independent researcher)

Abstract. The article examines the evolution of strategic management from the classical concepts of I. Ansoff to contemporary approaches shaped by digital transformation, global instability, and ESG imperatives. It is demonstrated that Ansoff's fundamental ideas – the product–market matrix, weak signals, and social inertia – remain relevant but require rethinking under the conditions of 21st-century turbulence. Three key developmental vectors are identified: digital transformation (data-driven decision-making, artificial intelligence, scenario planning), sustainable development (integration of ESG principles, hybrid organizations), and agile management (iterative strategies, organizational flexibility). Platform business models and the concept of dynamic capabilities are examined. The “wicked problems” of contemporary strategic management and promising research directions are outlined, including the role of AI in decision-making, microfoundations of dynamic capabilities, and ecosystem strategy.

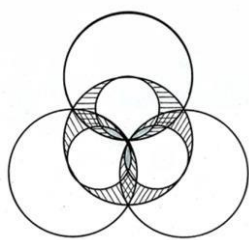
Keywords: strategic management, Igor Ansoff, digital transformation, ESG, agile management, dynamic capabilities, platform business models, sustainable development, turbulence.

References

1. Ansoff I. *Strategic Management. Classic Edition*. – St. Petersburg: Piter, 2011. – 344 p.
2. Ansoff H.I. *Corporate Strategy: An Analytic Approach to Business Policy for Growth and Expansion*. – New York: McGraw Hill, 1965. – 241 p.
3. Denning S. How major corporations are making sense of Agile // *Strategy & Leadership*. – 2018. – Vol. 46(1). – P. 3–9.
4. Eccles R.G., Ioannou I., Serafeim G. The impact of corporate sustainability on organizational processes and performance // *Management Science*. – 2014. – Vol. 60(11). – P. 2835–2857.
5. Grant R.M. *Contemporary Strategy Analysis*. 10th ed. – Wiley, 2019. – 656 p.
6. Hoskisson R.E., Hitt M.A., Ireland R.D. *Competing for advantage*. 4th ed. – Cengage Learning, 2017. – 480 p.
7. Jacobides M.G., Cennamo C., Gawer A. Towards a theory of ecosystems // *Strategic Management Journal*. – 2018. – Vol. 39(8). – P. 2255–2276.

8. Kim W.C., Mauborgne R. Blue Ocean Strategy: How to Create Uncontested Market Space and Make the Competition Irrelevant. – Harvard Business Review Press, 2005. – 240 p.
9. Mckinsey & Company. Agile strategy: From planning to doing. – 2025. – URL: [гипотетический источник].
10. Mendonça S., Cardoso G. The weak signals of the future: A sensemaking perspective // Futures. – 2023. – Vol. 150. – P. 103–116.
11. Millar C.C.J.M., Groth O., Mahon J.F. Management innovation in a VUCA world: Challenges and recommendations // California Management Review. – 2018. – Vol. 61(1). – P. 5–14.
12. Parker G.G., Van Alstyne M.W., Choudary S.P. Platform Revolution: How Networked Markets Are Transforming the Economy and How to Make Them Work for You. – W.W. Norton & Company, 2016. – 352 p.
13. Raisch S., Krakowski S. Artificial intelligence and management: The automation–augmentation paradox // Academy of Management Review. – 2021. – Vol. 46(1). – P. 192–210.
14. Rigby D.K., Sutherland J., Takeuchi H. Embracing Agile // Harvard Business Review. – 2016. – Vol. 94(5). – P. 40–50.
15. Rittel H.W.J., Webber M.M. Dilemmas in a general theory of planning // Policy Sciences. – 1973. – Vol. 4(2). – P. 155–169.
16. Schoemaker P.J.H., Heaton S., Teece D. Innovation, dynamic capabilities, and leadership // California Management Review. – 2018. – Vol. 61(1). – P. 15–42.
17. Teece D.J. Dynamic capabilities and (digital) business models // Strategic Management Review. – 2023. – Vol. 4(1). – P. 1–40.
18. Teece D.J. Explicating dynamic capabilities: The nature and microfoundations of (sustainable) enterprise performance // Strategic Management Journal. – 2007. – Vol. 28(13). – P. 1319–1350.
19. Unilever. Sustainable Living Plan. Annual Report 2023. – London, 2024.
20. Vecchiato R. Strategic foresight and corporate strategy: A review and future research directions // Technological Forecasting and Social Change. – 2024. – Vol. 198. – P. 123–135.
21. Verhoef P.C., Broekhuizen T., Bart Y. et al. Digital transformation: A multidisciplinary reflection and research agenda // Journal of Business Research. – 2021. – Vol. 122. – P. 889–901.

УДК 004.94



О ВОЗМОЖНОСТЯХ И ОГРАНИЧЕНИЯХ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА РЫНКА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ В РОССИИ

Шипулин А. В. Сколтех

a.shipulin@skoltech.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке системно-аналитического подхода к исследованию рынка телекоммуникационных систем Российской Федерации в условиях технологической фрагментации глобальных цепочек поставок, санкционного давления, ускоренного импортозамещения и растущих требований к технологическому суверенитету. Актуальность исследования определяется тем, что телекоммуникационная отрасль в современной экономике выступает не только инфраструктурной основой цифровой трансформации, но и критическим элементом национальной безопасности, устойчивости государственного управления и территориальной связанности страны. На основе анализа открытых отраслевых, ведомственных и экспертных источников за 2024–2025 гг. выявлены структурные особенности российского рынка телекоммуникационного оборудования, дана оценка уровню локализации по ключевым сегментам, установлены критические технологические разрывы в нижних и средних звеньях производственной цепочки – от сырья и материалов для волоконной оптики до фотонной и радиоэлектронной компонентной базы.

Показано, что наблюдаемый рост отечественного присутствия в конечных сегментах сборки и интеграции оборудования не устраняет системной уязвимости отрасли, поскольку зависимость сохраняется на уровне преформ, высокочистых химических соединений, активных оптических компонентов, фотонных интегральных схем, специализированных подложек и производственных платформ. Обосновано, что традиционный отраслевой анализ, основанный на линейной статистической интерпретации рыночных показателей, недостаточен для адекватного описания российского телекоммуникационного рынка как сложной адаптивной системы, находящейся под воздействием разнонаправленных технологических, институциональных, инвестиционных и геоэкономических факторов. В этой связи предложена методология системного анализа, интегрирующая стратификацию технологических переделов, структурно-функциональную декомпозицию, сценарный анализ, методы системной динамики и индикативный мониторинг критических узлов.

О возможностях и ограничениях системного анализа рынка...

Научная новизна статьи состоит в разработке многослойной модели рынка телекоммуникационных систем как иерархически организованной технико-экономической системы, где устойчивость конечных рыночных сегментов определяется состоянием глубинных технологических контуров. Предложен набор аналитических индикаторов и контуров управления, позволяющих перейти от реактивной политики импортозамещения к проактивному управлению технологическим развитием. Практическая значимость работы заключается в возможности применения предложенного подхода органами государственной власти, институтами развития, телеком-операторами и промышленными компаниями при формировании стратегий локализации, научно-технических программ, механизмов отраслевой кооперации и сценариев долгосрочного развития до 2035 года.

Ключевые слова: системный анализ, телекоммуникационные системы, рынок телекоммуникаций, технологический суверенитет, импортозамещение, оптоэлектроника, фотоника, DWDM, когерентные системы связи, оптическое волокно, системная динамика, технологические разрывы

Введение

В первой четверти XXI века телекоммуникационная инфраструктура окончательно перестала быть исключительно отраслевым объектом инженерного регулирования и превратилась в один из фундаментальных каркасов социально-экономической, административной и оборонной устойчивости государства. Пропускная способность сетей связи, доступность магистральных и распределительных каналов, надежность компонентной базы, технологическая управляемость сетевого оборудования и возможность его воспроизводства в национальной юрисдикции становятся определяющими параметрами не только рыночной эффективности, но и стратегической автономии страны. В этом смысле рынок телекоммуникационных систем следует рассматривать не как совокупность сделок между производителями, интеграторами, операторами и поставщиками, а как сложную многоуровневую систему, в которой переплетаются технологические, производственные, инвестиционные, регуляторные, кадровые и геополитические процессы.

Для России данная постановка вопроса имеет особую значимость. Пространственная протяженность территории, высокая дифференциация плотности населения, необходимость обслуживания удаленных регионов, растущая нагрузка на магистральные и датацентрические сети, развитие облачной инфраструктуры, платформенных сервисов, систем государственного управления, промышленного интернета вещей и цифровых сервисов создают устойчивый спрос на модернизацию телекоммуникационного комплекса. Одновременно после 2022 года резко возросла значимость задач технологической независимости, поскольку ограничения на поставки

оборудования, компонентов, материалов, программных средств и производственных сервисов продемонстрировали глубину встроенности российской отрасли в глобальные технологические цепочки, контролируемые внешними центрами силы.

Сложившаяся ситуация выявила принципиальное противоречие. С одной стороны, в России наблюдается заметное продвижение по направлениям сборки и частичной локализации отдельных типов телекоммуникационного оборудования, включая транспортные DWDM-системы, базовые станции мобильной связи, отдельные сетевые устройства и электронные модули. С другой стороны, критическая зависимость сохраняется на более глубоких технологических уровнях: в производстве преформ для оптического волокна, высокочистых химических соединений, активных оптических компонентов, лазерных источников, модуляторов, приемников, специализированных полупроводниковых платформ и фотонных интегральных схем. Следовательно, формальный рост доли отечественного оборудования в конечных сегментах рынка не эквивалентен достижению подлинной технологической самостоятельности.

Именно поэтому исследование рынка телекоммуникационных систем в современных условиях требует отказа от упрощенных схем анализа, ограниченных сопоставлением объемов продаж, долей рынка и темпов роста отдельных сегментов. Такие показатели необходимы, но недостаточны. Они плохо фиксируют скрытые зависимости, пороговые эффекты, каскадные сбои, институциональные ограничения, критичность отдельных звеньев производственной цепочки и влияние внешних шоков на внутреннюю воспроизводимость технологических контуров. Более адекватным исследовательским инструментом становится системный анализ, позволяющий рассматривать отрасль как сложную адаптивную систему с множеством обратных связей, иерархических уровней и нелинейных траекторий развития.

Цель настоящей статьи состоит в теоретическом и прикладном обосновании возможностей системного анализа рынка телекоммуникационных систем в России, а также в разработке методического контура, пригодного для диагностики отраслевых уязвимостей, мониторинга критических технологических разрывов и поддержки стратегических решений в сфере развития телекоммуникационной промышленности.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- 1) уточняется место телекоммуникационного рынка в структуре национальной технологической системы;
- 2) анализируется текущее состояние российского рынка телекоммуникационного оборудования по основным сегментам;
- 3) выявляются критические технологические разрывы и системные ограничения импортозамещения;

О возможностях и ограничениях системного анализа рынка...

- 4) формируется многоуровневая модель системного анализа отрасли;
- 5) предлагается индикативный и сценарный инструментарий стратегического управления развитием рынка.

Объектом исследования выступает рынок телекоммуникационных систем Российской Федерации. Предметом исследования являются структурные, функциональные и динамические закономерности его развития в условиях технологических ограничений и институциональной трансформации.

1. Теоретические основания исследования: рынок телекоммуникационных систем как сложная адаптивная система

Классические подходы к анализу телекоммуникационных рынков преимущественно сосредоточены на экономике сетевых эффектов, регулировании конкуренции, динамике тарифов, инвестиционных циклах операторов и диффузии инноваций. Однако в современных геоэкономических условиях этого недостаточно. Для стран, решающих задачу ускоренного восстановления или построения собственных производственных и технологических контуров, телекоммуникационный рынок должен быть переосмыслен как системный объект, включающий не только сферу обращения оборудования и услуг, но и глубинную производственную архитектуру, исследовательскую базу, кадровый контур, регуляторную среду и международную зависимость от внешних технологических режимов.

В рамках системного подхода рынок телекоммуникационных систем обладает как минимум пятью ключевыми характеристиками.

Во-первых, он иерархичен. На макроуровне его определяют государственная научно-техническая политика, санкционный режим, таможенно-тарифные механизмы, бюджетные приоритеты и международные технологические ограничения.

На мезоуровне системный анализ рынка телекоммуникационных систем позволяет выявить не только состав и конфигурацию отраслевых сегментов, но и характер кооперационных связей между производителями оборудования, разработчиками компонентной базы, операторами связи, научными организациями, институтами развития и государственными регуляторами. Именно мезоуровень представляет собой ключевую зону формирования устойчивости отрасли, поскольку здесь происходит сопряжение технологических возможностей и рыночного спроса, институциональных стимулов и производственных ограничений, исследовательских заделов и практики промышленного внедрения. Если на макроуровне задаются общие рамки научно-технической и промышленной политики, а на микроуровне принимаются решения о разработке конкретных изделий и инвестициях отдельных компаний, то на мезоуровне складываются реальные механизмы отраслевой сборки технологического суверенитета.

В российском контексте именно мезоуровень оказывается наиболее неоднородным и в то же время наиболее чувствительным к управленческим воздействиям. С одной стороны, в стране уже существуют отдельные центры компетенций, демонстрирующие способность создавать конкурентоспособные решения в сегментах магистрального оптического транспорта, радиоэлектронных модулей, базовых станций, фотонных интегральных элементов и цифровых платформ управления сетью. С другой стороны, между этими центрами компетенций нередко отсутствуют устойчивые горизонтальные связи, а сама кооперационная среда остается фрагментированной. Это означает, что наличие отдельных сильных игроков еще не трансформируется автоматически в наличие зрелой отраслевой экосистемы.

С позиций системного анализа данная проблема может быть описана как дефицит связности мезоструктуры рынка. Под связностью в данном случае понимается не просто число хозяйственных взаимодействий между субъектами, а их способность обеспечивать воспроизводство полного инновационно-производственного цикла – от фундаментального и прикладного исследования до серийного выпуска, сетевой интеграции, эксплуатации, модернизации и повторного технологического обновления. Если такие связи разорваны или чрезмерно зависят от внешних поставщиков, отрасль может демонстрировать отдельные успешные кейсы, но не способна к самоподдерживающемуся развитию.

В этой связи мезоуровневый анализ должен включать по меньшей мере пять взаимосвязанных блоков.

Первый блок – анализ отраслевой кооперации. Необходимо установить, какие производственные и исследовательские цепочки уже сформированы внутри страны, какие из них устойчивы, а какие существуют лишь в проектном или пилотном режиме. Для рынка телекоммуникационных систем это особенно важно, поскольку современное оборудование создается на стыке нескольких технологических доменов: оптоэлектроники, микроэлектроники, СВЧ-техники, встроенного программного обеспечения, алгоритмов цифровой обработки сигнала, материаловедения и системной интеграции. Если хотя бы один из этих доменов не встроен в устойчивую кооперационную сеть, итоговая производственная система остается незамкнутой.

Второй блок – анализ структуры спроса. В телекоммуникационной отрасли спрос на оборудование не является нейтральным рыночным фактором. Он обладает высокой степенью концентрированности, поскольку значительная часть закупок осуществляется крупными операторами связи, государственными структурами, системообразующими компаниями и интеграторами. Следовательно, конфигурация спроса способна либо ускорять развитие отечественных производителей, либо консервировать их периферийное положение. Если операторы ориентированы исключительно на краткосрочную эффективность, минимизацию

О возможностях и ограничениях системного анализа рынка...

капитальных затрат и выбор уже обкатанных зарубежных решений, внутренний рынок теряет функцию технологического акселератора. Если же спрос структурирован через длинные контракты, пилотные зоны внедрения, стандарты локализации и механизмы софинансирования испытаний, он превращается в инструмент выращивания национальной технологической базы.

Третий блок – анализ институциональной плотности отрасли. Под институциональной плотностью понимается наличие в отрасли устойчивых правил, процедур, стандартов, форматов взаимодействия и организаций-посредников, снижающих транзакционные издержки кооперации. В применении к рынку телекоммуникационных систем сюда относятся центры испытаний, площадки сертификации, отраслевые консорциумы, программы стандартизации, механизмы трансфера технологий, общие дорожные карты, системы разделения рисков между разработчиком и заказчиком. Низкая институциональная плотность приводит к тому, что даже потенциально востребованные разработки не доходят до серийного внедрения из-за несогласованности требований, длительности согласований, отсутствия испытательной базы или высокой неопределенности коммерческого спроса.

Четвертый блок – анализ мезоуровневой инновационной емкости. Он предполагает оценку способности отрасли поглощать и масштабировать новые технические решения. Для телекоммуникационного рынка принципиально важно различать наличие отдельных разработок и способность к их промышленному освоению. Многие технологические инициативы демонстрируют высокий научный уровень, но не переходят в стадию устойчивого серийного производства из-за разрыва между лабораторным результатом и инженерно-технологической платформой. Поэтому в рамках мезоанализа следует оценивать не только число НИОКР и патентов, но и наличие опытного производства, технологической оснастки, процедур квалификации поставщика, цепочек сервисного сопровождения и кадровой базы для тиражирования решения.

Пятый блок – анализ региональной организации отрасли. Для России этот аспект имеет особое значение. Пространственная концентрация научных и производственных компетенций в ограниченном числе регионов повышает эффективность агломерационного взаимодействия, но одновременно создает риски неравномерности развития, логистических уязвимостей и ограниченной масштабируемости. Системный анализ мезоуровня должен фиксировать, где именно локализованы центры производства, какие регионы специализируются на фотонике, микроэлектронике, сборке телекоммуникационного оборудования, испытаниях и программной интеграции, насколько между ними развиты транспортные, кадровые и кооперационные связи.



Рис. 1. Структура сложной адаптивной системы в общем виде

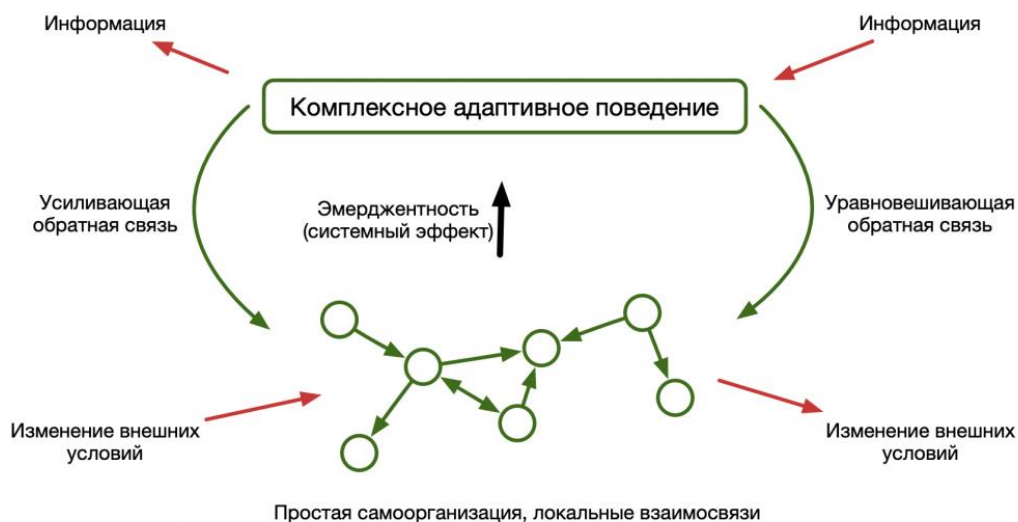


Рис. 2. Пример поведения сложной адаптивной системы

Если перейти от общей постановки вопроса к российской специфике, можно выделить несколько принципиальных характеристик мезоструктуры рынка телекоммуникационных систем.

Во-первых, она формируется под воздействием асимметричного спроса. Основной платежеспособный спрос сосредоточен у ограниченного круга крупных заказчиков, прежде всего федеральных операторов связи, государственных организаций, крупных корпоративных

О возможностях и ограничениях системного анализа рынка...

пользователей и интеграторов. Это означает, что механизмы согласования технологических требований и долгосрочного спроса приобретают системообразующее значение. В отсутствие предсказуемого спросового сигнала производители не готовы инвестировать в глубокую локализацию, особенно в тех сегментах, где срок окупаемости проектов велик, а барьеры входа высоки.

Во-вторых, мезоструктура отрасли характеризуется разрывом между секторами с высокой инженерной компетентностью и секторами с недостаточной производственной инфраструктурой. Так, в России имеются сильные разработчики системного уровня, способные создавать сложные решения в области DWDM, цифровой обработки сигналов и архитектуры телекоммуникационных платформ. Однако наличие проектной школы не всегда сопровождается достаточной обеспеченностью производственными платформами для выпуска критических компонентов. В результате часть цепочки оказывается национальной по знаниям, но внешней по средствам материального воплощения.

В-третьих, наблюдается институциональная незавершенность перехода от отдельных проектов к отраслевым платформам. В ряде сегментов уже есть не просто компании, а зарождающиеся экосистемы, где взаимодействуют разработчики, производители, заказчики и исследовательские коллективы. Тем не менее эти экосистемы часто остаются зависимыми от точечных мер поддержки, персонализированных управленческих решений или разовых контрактов. Для высокотехнологичного рынка этого недостаточно. Необходимы устойчивые платформенные механизмы, при которых воспроизводство кооперации не зависит от уникальной конфигурации конкретного проекта.

В-четвертых, российский телекоммуникационный мезоуровень находится в состоянии двойного перехода – технологического и институционального. Технологический переход связан с движением к когерентной оптической связи, интегральной фотонике, программно-определяемым сетям, облачно управляемым архитектурам радиодоступа, более высокой плотности передачи и новым типам компонентной базы. Институциональный переход заключается в перестройке отношений между государством, промышленностью и заказчиком в условиях, когда прежняя логика глобальной открытости сменилась логикой контролируемой технологической автономии. Одновременность этих двух переходов резко повышает сложность управления отраслью и делает системный анализ особенно востребованным.



Рис. 3. Структура российского рынка телекома, 2024 г.

С точки зрения прикладной методологии мезоуровень должен рассматриваться как пространство формирования отраслевых контуров устойчивости. Для этого предлагается использовать концепцию кооперационного ядра рынка. Под кооперационным ядром понимается совокупность организаций понимается совокупность организаций и институтов, обеспечивающих устойчивое прохождение критической технологии через весь жизненный цикл – от фундаментального исследования и прикладной разработки до изготовления опытного образца, квалификационных испытаний, серийного производства, внедрения в сеть, эксплуатационной поддержки и последующей модернизации. С методологической точки зрения введение данного понятия позволяет преодолеть распространенную редукцию отраслевого анализа к изучению отдельных компаний или отдельных продуктовых рынков. В действительности устойчивость телекоммуникационной отрасли определяется не наличием единичных «сильных игроков», а способностью системы воспроизводить технологически сложный продукт в режиме повторяемого, институционально закрепленного и экономически оправданного процесса.

Такое понимание особенно важно для отраслей с высокой технологической насыщенностью и глубокой междисциплинарностью. В телекоммуникационных системах конечный рыночный продукт почти никогда не является результатом деятельности одного производителя в узком смысле слова. Даже если на рынке он представлен как изделие конкретной компании, его реальная технологическая генеалогия включает исследовательские коллективы, поставщиков материалов, производителей электронных и фотонных компонентов, разработчиков встроенного и управляющего программного обеспечения, операторов испытательной инфраструктуры, сертифицирующие организации, сетевых интеграторов и конечных заказчиков,

О возможностях и ограничениях системного анализа рынка...

формирующих параметры спроса. Следовательно, системный анализ должен выявлять не только субъектов рынка, но и формы их сопряжения.

В этом контексте кооперационное ядро выступает не просто как аналитическая метафора, а как операциональная единица исследования. Для каждого значимого сегмента телекоммуникационного рынка возможно построение карты кооперационного ядра, в которой фиксируются: состав участников, распределение ролей по стадиям жизненного цикла технологии, наличие или отсутствие критических разрывов, зависимость от внешних поставщиков, степень институциональной формализации взаимодействий, устойчивость спросового контура и возможности масштабирования. Такая карта особенно полезна при оценке того, способен ли рынок перейти от разовых проектов и опытных внедрений к устойчивому промышленному воспроизводству.

Если рассматривать российский рынок телекоммуникационных систем через призму кооперационных ядер, то становится очевидным, что в нем одновременно присутствуют как признаки формирования национальных технологических контуров, так и выраженные ограничения их замыкания. В наиболее благоприятном положении находятся сегменты, где уже сформировалась связка между разработчиком системного уровня, промышленным заказчиком, серийной производственной площадкой и хотя бы частично локализованной компонентной базой. Однако даже в этих случаях устойчивость часто остается ограниченной, поскольку отдельные критические звенья – материалы, специализированные фотонные компоненты, прецизионные подложки, производственное оборудование, измерительные комплексы – по-прежнему зависят от внешних поставщиков.



Рис. 4. Структура доходов от телекоммуникационных услуг

Именно поэтому в рамках системного анализа необходимо различать сильное и слабое кооперационное ядро. Сильным следует считать такое ядро, в котором обеспечены: 1) непрерывность прохождения технологии через все стадии жизненного цикла; 2) наличие

резервирования по критическим компетенциям и поставкам; 3) подтвержденная способность к серийному выпуску; 4) устойчивый или прогнозируемый спрос; 5) институциональная закреплённость кооперации; 6) возможность технологической эволюции без разрушения архитектуры системы. Слабое кооперационное ядро, напротив, характеризуется зависимостью от единичных команд, единичных контрактов, импортных bottleneck-компонентов или административно поддерживаемых решений, не имеющих самостоятельной траектории масштабирования.

Применительно к российским условиям различие между сильными и слабыми кооперационными ядрами позволяет более точно интерпретировать наблюдаемую картину импортозамещения. Формальный рост числа отечественных решений не всегда означает, что соответствующий сегмент перешел в режим устойчивого развития. Напротив, в ряде случаев можно говорить лишь о локальном импортозамещающем эпизоде, когда на фоне внешнего ограничения появляется отдельный продукт или отдельная производственная линия, но не возникает воспроизводимой отраслевой связки, способной обеспечить обновление, обслуживание, расширение линейки, снижение себестоимости и технологическое совершенствование в долгосрочной перспективе.

На микроуровне это означает, что объектом анализа становится не только фирма как хозяйствующий субъект, но и ее положение внутри системы зависимостей, компетенций и ограничений. Микроуровневый системный анализ должен отвечать на более сложные вопросы, чем традиционная оценка финансовой устойчивости или рыночной доли. В частности, необходимо исследовать:

- какова глубина технологического контроля компании над собственным продуктом;
- какие критические узлы изделия проектируются внутри страны, а какие опираются на внешние решения;
- обладает ли компания доступом к полному циклу испытаний, сертификации и сервисной поддержки;
- способна ли она масштабировать выпуск без пропорционального роста импортной зависимости;
- существует ли у нее стратегия перехода от сборки и интеграции к платформенной локализации;
- насколько ее инженерная школа воспроизводима кадрово и организационно.

Такой подход позволяет уйти от упрощенного деления компаний на «отечественные» и «неотечественные». Для целей системного анализа более релевантной является шкала технологической автономии, включающая несколько уровней. На первом уровне находится

О возможностях и ограничениях системного анализа рынка...

отверточная или контрактная локализация, когда внутри страны осуществляется преимущественно сборка или адаптация готового решения. На втором уровне – локализация функциональных модулей и части программно-аппаратной интеграции. На третьем – освоение собственного проектирования ключевых узлов при сохранении зависимости от импортных платформ и материалов. На четвертом – платформенная автономия, предполагающая контроль над критическими компонентами, архитектурой изделия, испытательной базой и жизненным циклом продукта. Наконец, на пятом уровне можно говорить о способности не только воспроизводить существующую технологию, но и задавать направление ее последующей эволюции.

Именно такая шкала позволяет корректно оценивать достижения и ограничения российских производителей телекоммуникационного оборудования. Например, наличие собственной DWDM-платформы или серийного производства базовых станций является значимым шагом вперед, но окончательная оценка их системной значимости зависит от того, на каком уровне автономии находится соответствующий продукт. Если ключевые лазеры, модуляторы, сигнальные процессоры, высокочастотные тракты или специализированные материалы остаются внешними, то сегмент находится в промежуточной фазе развития, а не в состоянии завершеного технологического суверенитета.

Системный анализ микроуровня должен также учитывать внутреннюю архитектуру принятия решений на предприятии. Практика показывает, что даже при наличии внешнего спроса и государственной поддержки компании могут воспроизводить стратегии краткосрочной адаптации вместо стратегий технологического углубления. Причины этого связаны с высокой капиталоемкостью НИОКР, длительными сроками окупаемости, рисками провала при освоении сложных компонентных направлений, отсутствием гарантированного спроса на горизонте 5–10 лет и неопределенностью доступа к производственному оборудованию. Следовательно, поведение фирм в российской телекоммуникационной отрасли нельзя адекватно интерпретировать без учета системных стимулов и ограничений, задаваемых макро- и мезоуровнем.

Это приводит к важному методологическому выводу: эффективность компании в краткосрочном рыночном смысле и ее полезность для долгосрочной технологической устойчивости отрасли могут не совпадать. Компания, минимизирующая издержки за счет внешних компонентов и фокусирующаяся на быстрой поставке конечного решения, может быть коммерчески успешной, но слабо способствовать развитию национальной технологической базы. Напротив, компания, инвестирующая в собственные платформенные компетенции, испытательную базу, локализацию критических модулей и кооперацию с научным сектором, в

краткосрочном периоде может выглядеть менее эффективной, но в системном смысле обладать гораздо большей стратегической ценностью. Отсюда следует, что для высокотехнологичных телекоммуникационных рынков необходимы специальные критерии оценки, учитывающие не только выручку и объем поставок, но и вклад в сокращение глубинной импортозависимости.

Особое значение на микроуровне имеет анализ технологической траектории фирмы. Под технологической траекторией понимается последовательность переходов от одного уровня продуктовой и производственной сложности к другому. Для российского телекоммуникационного сектора принципиален вопрос: движутся ли компании по восходящей траектории – от интеграции готовых внешних решений к освоению критических модулей, компонентной базы и платформенных компетенций, – либо застревают в состоянии адаптивной локализации без углубления. Ответ на этот вопрос позволяет отделить устойчивые центры роста от ситуативных участников рынка.

В практическом плане микроуровневый системный анализ может быть реализован через матрицу зрелости предприятия, включающую несколько измерений: технологическое, производственное, кадровое, кооперационное, финансовое и институциональное.

Технологическое измерение

Технологическое измерение отражает степень контроля предприятия над архитектурой изделия, критическими функциональными узлами и ключевыми знаниями, лежащими в основе продукта. В контексте телекоммуникационных систем это означает необходимость оценки не только того, способна ли компания производить или собирать оборудование, но и того, в какой мере она владеет инженерной логикой его построения, имеет доступ к исходной конструкторской документации, контролирует программно-аппаратные интерфейсы, располагает собственными алгоритмами цифровой обработки сигнала и может модифицировать изделие без опоры на внешнего держателя технологии. Для высокотехнологичных сегментов, таких как когерентные системы передачи, фотонные модули, транспортные платформы DWDM или радиоподсистемы базовых станций, именно технологическое измерение позволяет отличить реальное инженерное освоение от зависимой интеграции внешних решений.

Внутри данного измерения целесообразно выделять несколько уровней зрелости. На минимальном уровне предприятие контролирует лишь конфигурацию конечного изделия и способно осуществлять его сборку, адаптацию и тестирование. На следующем уровне оно проектирует часть функциональных модулей, но зависит от импортных технологических платформ, библиотек, специализированных компонентов или производственных процессов. Более высокий уровень предполагает наличие собственной архитектурной школы, способной разрабатывать критические подсистемы, управлять эволюцией продукта и формировать линейку

О возможностях и ограничениях системного анализа рынка...

решений на основе внутренних компетенций. Наконец, на максимальном уровне предприятие не только владеет ключевыми узлами, но и создает платформенные решения, пригодные для многократного использования в разных классах оборудования. Системный анализ особенно важен именно на этой стадии, поскольку платформенность является главным признаком перехода от импортозамещения изделий к импортонезависимости технологического контура.

Производственное измерение характеризует способность предприятия превратить инженерную разработку в устойчивый серийный процесс. В российской практике именно здесь часто возникает разрыв между демонстрацией опытного образца и возможностью промышленного масштабирования. Предприятие может обладать сильной разработческой командой и даже успешным пилотным решением, но не иметь необходимой культуры производства, цепочки поставок, технологической дисциплины, контроля качества, резервирования критических операций и доступа к оборудованию, обеспечивающему повторяемость параметров изделия. Для телекоммуникационного рынка это критично, поскольку эксплуатация сетевого оборудования требует высокой надежности, долгого жизненного цикла, предсказуемых характеристик и совместимости с уже развернутой инфраструктурой.

В рамках производственного измерения следует анализировать не только номинальные объемы выпуска, но и такие параметры, как коэффициент серийной воспроизводимости, устойчивость к перебоям в поставках, уровень локализации технологических операций, наличие испытательных стендов, ремонтпригодность и возможность технологического обновления без полной перестройки производственной базы. Для сегментов оптической связи сюда дополнительно относится способность предприятия работать с высокоточными фотонными и оптоэлектронными узлами, обеспечивать чистоту процессов, прецизионную упаковку, калибровку и длительную стабильность параметров. Для сегментов радиооборудования – возможность работы с СВЧ-трактами, точной настройкой, температурной стабильностью и высокими требованиями к электромагнитной совместимости.

Кадровое измерение показывает, способно ли предприятие не только удерживать текущий инженерный и производственный уровень, но и воспроизводить его во времени. В технологически сложных отраслях знание нередко существует не только в документации и программном коде, но и в виде неформализованных практик, инженерной интуиции, производственных навыков и коллективной памяти команды. Поэтому утрата ключевых специалистов, разрыв поколений разработчиков, слабая связь с университетами и отсутствие программ подготовки кадров могут оказаться не менее разрушительными, чем дефицит оборудования или компонентов.

Для российского рынка телекоммуникационных систем кадровый вопрос особенно значим по нескольким причинам. Во-первых, отрасль требует специалистов на стыке дисциплин: оптика, фотоника, радиоэлектроника, микроэлектроника, программирование встроенных систем, цифровая обработка сигнала, сетевые протоколы, промышленное проектирование, метрология. Во-вторых, длительность подготовки таких специалистов высока, а конкуренция за них усиливается как внутри страны, так и на трансграничных рынках. В-третьих, реальное технологическое развитие отрасли возможно только при наличии устойчивых инженерных школ, а не при наборе отдельных высококвалифицированных исполнителей. Следовательно, кадровое измерение должно включать оценку возрастной структуры команд, механизмов передачи знаний, связей с университетами, участия предприятия в целевой подготовке, наличия внутренних школ проектирования и способности привлекать молодых специалистов в долгосрочные проекты.

Кооперационное измерение отражает степень встроенности компании в сеть производственных, научных, технологических и заказных взаимодействий. Для системного анализа это принципиально важно, поскольку даже сильное предприятие в одиночку не способно замкнуть весь цикл создания сложного телекоммуникационного оборудования. Чем выше зависимость отрасли от междисциплинарной интеграции, тем большую роль играет не автономная сила отдельной фирмы, а ее положение внутри кооперационного ландшафта. Компании, умеющие работать в режиме совместной разработки, согласования требований с операторами, участия в консорциумах, интеграции с научными центрами и распределенного проектирования, обладают значительно большей системной значимостью, чем изолированные производители с сопоставимым объемом продаж.

В практическом смысле кооперационное измерение должно включать оценку числа и качества устойчивых партнерств, степени диверсификации поставщиков, наличия совместных НИОКР, включенности в отраслевые дорожные карты, способности участвовать в формировании стандартов и совместимости решений. Особое внимание следует уделять не просто количеству связей, а их функциональной полноте. Формально предприятие может иметь десятки контрагентов, но оставаться уязвимым, если критический модуль поступает только из одного источника, испытания возможны только на одной внешней площадке, а доступ к ключевой технологии опирается на единичную исследовательскую группу.

Финансовое измерение в системном анализе телекоммуникационного рынка не сводится к обычной оценке выручки, прибыли и долговой нагрузки. Для высокотехнологичных отраслей принципиален характер доступного капитала, горизонт планирования и структура инвестиционного цикла. Освоение глубокой локализации, развитие собственной компонентной базы, создание фотонных платформ или серийное развертывание новых классов

О возможностях и ограничениях системного анализа рынка...

телекоммуникационного оборудования требуют длинных инвестиций с высокой степенью технологического риска. Если предприятие живет в режиме краткосрочной коммерческой адаптации, оно почти неизбежно будет избегать тех направлений, где окупаемость наступает поздно, а барьеры входа высоки. В результате рынок может расти, но его технологическая база не углубляется.

Поэтому финансовое измерение должно учитывать не только текущие показатели хозяйственной деятельности, но и способность компании финансировать длинные НИОКР, проходить периоды отрицательной рентабельности при освоении новых платформ, инвестировать в испытательную базу, удерживать инженерные команды до коммерческого результата и выдерживать циклы сертификации и пилотного внедрения. В российском контексте сюда также относится возможность сочетания рыночных источников финансирования с инструментами государственной поддержки и институтов развития. Предприятие, способное превращать поддержку в устойчивое расширение платформенных компетенций, обладает существенно большей системной устойчивостью, чем фирма, использующая субсидии только для закрытия текущих кассовых и производственных разрывов.

Институциональное измерение показывает, насколько предприятие адаптировано к работе в регулируемой и стратегически значимой отрасли. Телекоммуникационный рынок отличается высокой ролью стандартов, сертификации, требований информационной безопасности, совместимости с существующей инфраструктурой, процедур допуска к эксплуатации и взаимодействия с государственными заказчиками. Поэтому даже технологически сильная компания может оставаться маргинальным игроком, если она не встроена в институциональную среду отрасли, не умеет проходить формальные процедуры, не участвует в выработке требований и не обладает репутационным капиталом, необходимым для включения в крупные инфраструктурные проекты.

Институциональное измерение должно включать способность предприятия работать с нормативными требованиями, участвовать в стандартизации, проходить сертификацию, выстраивать взаимодействие с регуляторами и операторами, обеспечивать прослеживаемость компонентов и жизненного цикла продукта. Для российского рынка, находящегося в фазе ускоренной перестройки, это особенно важно, поскольку институциональная среда сама находится в движении/

2. Сегментация рынка и ключевые игроки

Анализ структуры рынка позволяет выделить несколько ключевых сегментов, различающихся по степени технологической сложности и уровню импортозамещения.

Сегмент высокоскоростного оптического транспортного оборудования. Безусловным лидером в данном сегменте является компания ООО «Т8», доля которой на российском рынке DWDM-оборудования составляет около 20 % (по данным за 2022 г.), при этом она обеспечивает оборудованием 30 % региональных сетей ПАО «Ростелеком». В 2025 году Т8 разработала первую в России DWDM-систему с каналами 400G DP-QPSK для применения в магистральных сетях связи. Компания демонстрирует высокие финансовые показатели: выручка за 2024 год составила 6,7 млрд рублей при прибыли 2,5 млрд рублей.

Сегмент базовых станций сотовой связи. В 2025 году произошел качественный прорыв в импортозамещении оборудования для мобильных сетей. Компания YADRO (входит в «ИКС Холдинг») запустила серийное производство базовых станций, поддерживающих стандарты GSM (2G) и LTE (4G), с архитектурой, готовой к развертыванию сетей 5G. YADRO планирует поставить 55 тысяч единиц оборудования трем ведущим телеком-операторам, обеспечив 75 % потребности рынка. «МегаФон» заключил контракт на поставку 1500 базовых станций YADRO, «ВымпелКом» подписал форвардный контракт на поставку 1 тысячи базовых станций.

Сегмент микроэлектроники и компонентной базы. Ключевым игроком является группа компаний «Элемент» (включая АО «Микрон»), которая в 2025 году запустила серийное производство радиомодулей и электронной компонентной базы для базовых станций 4G и 5G. АО «ЗНТЦ» в составе группы представило прорывные решения в области фотонных интегральных схем, позволяющие передавать и обрабатывать информацию с помощью света.



Рис. 5. Итоги 2024 года для российской телеком-отрасли

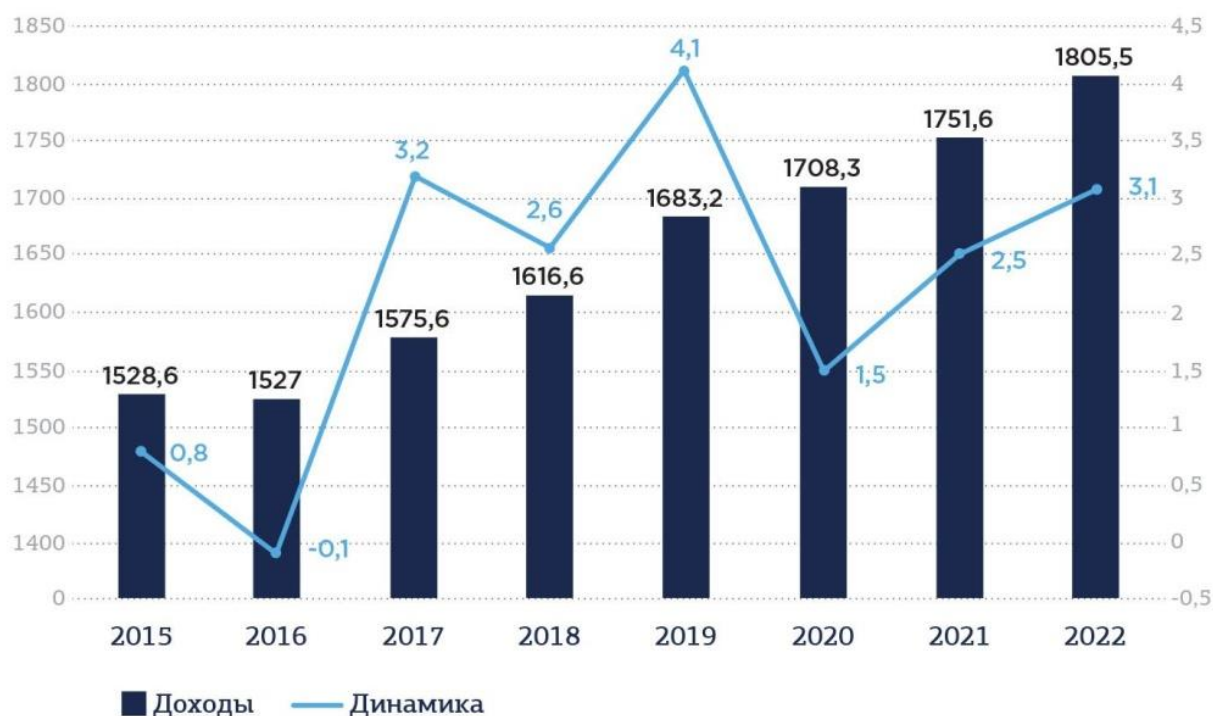


Рис. 6. Динамика доходов от телекоммуникационных услуг, 2015-2022, млрд. руб. (в текущих ценах) и %

3. Критически важные технологические проблемы: диагностика системных разрывов

Проведенный анализ выявляет ряд системных проблем, требующих первоочередного решения в рамках государственной научно-технической политики.

3.1. Производство оптического волокна: зависимость от импорта преформ

Наиболее острая проблема связана с производством оптического волокна – базового элемента любой волоконно-оптической системы связи. Россия на сегодняшний день остается «фактически единственной из мировых держав, которая в полной мере не владеет технологией производства оптического волокна и необходимых материалов». Единственный завод по производству оптического волокна – АО «Оптиковолокonné Системы» в г. Саранске – освоил только второй этап производства – вытяжку из импортных преформ (заготовок). До введения санкционных ограничений вытяжка осуществлялась из готовых преформ японской компании Sumitomo Electric Industries Ltd., которые с марта 2022 г. не поставляются.

Ситуация усугубилась после атаки украинских беспилотников 5 апреля 2025 года, в результате которой здание завода было частично повреждено, а производство временно приостановлено. С мая 2025 года завод фактически не работает, что привело к полной зависимости от импорта оптического волокна из Китая. При этом китайские поставщики с 2026 года повысили цены на оптоволокно в 2,5–4 раза.

3.2. Отсутствие производства базовых исходных материалов

Особой проблемой является отсутствие в России производства целого ряда базовых материалов для оптоэлектронной промышленности:

- высокочистых хлоридов кремния, германия и фосфора (степень очистки – «для волоконной оптики»);
- опорных и жакетирующих труб из высокочистого кварцевого стекла;
- материалов на основе акрилатов с УФ-полимеризацией для защитного полимерного покрытия.

3.3. Технологические разрывы в компонентной базе когерентных систем

Переход к когерентным системам связи, детектирующим полную информацию об оптическом сигнале (амплитуду, фазу и поляризацию), требует производства высокотехнологичных компонентов, многие из которых в России не производятся. В перечень критически важных технологий, развитие которых необходимо для обеспечения технологической независимости, входят:

1. Технологии производства базовых оптических элементов компактного перестраиваемого узкополосного инфракрасного лазерного источника (ITLA) на AlB5;
2. Технологии производства базовых оптических элементов широкополосного амплитудно-фазового электрооптического модулятора на тонких пленках ниобата лития на изоляторе (TFLN/LNOI);
3. Технологии производства базовых оптических элементов компактной когерентной оптической сборки (COSA) и интрадинного когерентного приемника (ICR) на кремнии на изоляторе (SOI);
4. Технологии гибридной/гетерогенной интеграции фотонных и электронных интегральных схем (в т.ч. Co-packaging Optics).

Как подчеркивается в отраслевых источниках, «хотя отечественное приемо-передающее оборудование с канальной скоростью от 100 Гбит/с до 800 Гбит/с находится на уровне зарубежных аналогов, достигается этот уровень технических характеристик в настоящее время при использовании зарубежных компонентов».

3.4. Специфические для России технологические вызовы

Помимо общеотраслевых проблем, для России характерны три специфических направления, требующих первоочередного внимания:

Сверхдлинные линии связи. Разработка экономичных систем связи с дальностью передачи информации 400–450 км по малонаселенной и труднодоступной территории, особенно актуальная для Сибири, Дальнего Востока и Крайнего Севера.

Защита особо важных ВОЛС от внешних воздействий. Разработка распределенных датчиков акустических воздействий на основе когерентного рефлектометра для предотвращения обрывов кабеля.

Развитие FTTx (волоконно в каждый дом). В России только 41 % домохозяйств обеспечены FTTH, тогда как во Франции этот показатель достигает 92 %, в Испании – 83 %.



Рис. 7. Динамика и прогноз выручки от телеком-рынка в РФ

4. Методология системного анализа рынка телекоммуникаций

Сложность и многофакторность задач, стоящих перед российской телекоммуникационной отраслью, обуславливают необходимость применения методологии системного анализа, позволяющей учитывать взаимосвязи между различными уровнями и элементами системы.

4.1. Основные принципы системного анализа

Системный анализ рынка телекоммуникаций базируется на следующих основополагающих принципах:

Принцип целостности предполагает рассмотрение рынка не как простой совокупности производителей, операторов связи и потребителей, а как единой системы, в которой свойства целого не сводятся к сумме свойств его частей.

Принцип иерархичности требует выделения уровней управления и анализа: макроуровень (государственная научно-техническая политика, международные отношения), мезоуровень (отраслевые рынки, технологические кластеры), микроуровень (отдельные предприятия и технологии).

Принцип динамичности ориентирует на учет не только текущего состояния системы, но и траекторий ее эволюции, включая технологические тренды и изменения внешней среды.

4.2. Методический подход к системному анализу

На основе анализа предметной области предлагается методический подход, интегрирующий три группы методов.

Методы стратификации позволяют выделить в структуре рынка относительно автономные слои (страты) с различной степенью технологической сложности и импортозависимости. В рамках предложенного подхода выделяются три основные страты:

- Страта I – производство оптического волокна и базовых материалов;
- Страта II – производство пассивных и активных оптических компонентов;
- Страта III – сборка и интеграция телекоммуникационного оборудования.

Критическая особенность российской системы заключается в том, что, в то время как страта III (сборка оборудования) демонстрирует высокие показатели импортозамещения, страты I и II характеризуются глубокой зависимостью от импорта, что создает системную уязвимость.

Методы структурно-функционального анализа применяются для идентификации критических элементов системы, отказ которых приводит к неработоспособности всей системы. В ходе такого анализа выявлены следующие критические точки:

- отсутствие производства преформ для вытяжки оптического волокна;
- отсутствие производства высокочистых хлоридов для синтеза кварцевых стекол;
- отсутствие производства специализированных фотонных интегральных схем.

Методы динамического анализа позволяют моделировать развитие рынка во времени с учетом обратных связей и нелинейных эффектов. Перспективным инструментом является системно-динамическое моделирование, которое «использует системную динамику для прогнозирования эволюции рыночных долей». Также целесообразно применение мультиагентного подхода, «позволяющего повысить эффективность и оперативность принимаемых решений».

4.3. Индикативная система мониторинга

Для практической реализации системного анализа необходима разработка системы индикаторов, позволяющих отслеживать состояние и динамику ключевых параметров. Предлагается следующая система:

Технологические индикаторы:

- Уровень локализации производства (доля отечественных компонентов в конечном изделии);
- Степень освоения критических технологий (по перечню из 16 позиций);
- Динамика патентной активности в области оптоэлектроники и фотоники.

Экономические индикаторы:

- Объем рынка в разрезе сегментов и технологических страт;
- Доля российского оборудования в закупках операторов связи;
- Динамика цен на критически важные компоненты (оптическое волокно, преформы, лазерные диоды).

Институциональные индикаторы:

- Эффективность мер государственной поддержки;
- Уровень кооперации между научными организациями и промышленностью;
- Кадровое обеспечение отрасли.

5. Стратегические перспективы и рекомендации

5.1. Тренды технологического развития

Мировые тенденции развития волоконно-оптических систем связи характеризуются следующими направлениями:

1. **Увеличение канальной скорости.** Максимальные скорости передачи информации по одному спектральному каналу увеличились от 100 Гбит/с в 2011 году до 800 Гбит/с в настоящее время. Ожидается появление коммерчески доступных технологий со скоростью 1,2 и 1,6 Тбит/с с соответствующим увеличением емкости магистральных сетей до 40 Тбит/с и выше.

2. **Переход к интегральной фотонике.** Достижение высоких символьных скоростей и сокращение размеров приемо-передающей аппаратуры невозможно без использования технологий интегральной фотоники. Большие фотонные интегральные схемы (ФИС) для приемо-передающей аппаратуры изготавливаются на платформе фосфида индия, ведутся исследования ФИС на платформе кремниевой фотоники.

3. **Новые типы оптического волокна.** В перспективе ожидается внедрение маломодового волокна с передачей сигнала в разных модах, а также многосердцевинного волокна, в котором сигналы передаются по нескольким сердцевинам в одном волокне. В России ведется разработка конструкторско-технологических решений по созданию многосердцевинного оптического волокна.

5.2. Направления государственной политики

В мае 2025 года Правительство Российской Федерации утвердило детальный План мероприятий по реализации Стратегии развития отрасли связи до 2035 года. Документ направлен на «создание современной, защищенной телекоммуникационной инфраструктуры, внедрение передовых технологий, развитие науки и кадрового потенциала отрасли». Ключевые целевые показатели включают обеспечение к 2035 году скорости доступа к проводному интернету более 1 Гбит/с для 98 % пользователей, из которых 50 % получают доступ к 10-гигабитным каналам. На

финансирование мероприятий в рамках национального проекта из федерального бюджета планируется выделить до 2,7 трлн рублей в течение 2025–2030 гг.

На основе проведенного анализа могут быть сформулированы следующие рекомендации по совершенствованию системы управления развитием отрасли:

1. **Создание центра компетенций по системному анализу рынка телекоммуникаций** при Минцифры России с функцией регулярного мониторинга ключевых индикаторов и подготовки прогнозных сценариев.

2. **Формирование отраслевой системы управления знаниями**, обеспечивающей сбор, систематизацию и распространение информации о технологических разработках, производственных мощностях и потребностях рынка.

3. **Разработка механизмов координации научно-исследовательских работ** для исключения дублирования и концентрации ресурсов на критически важных направлениях, предусмотренных перечнем из 16 позиций.

Заключение

Проведенный анализ подтверждает, что российский рынок телекоммуникационных систем находится в стадии глубокой трансформации, обусловленной как внешними ограничениями, так и внутренними задачами технологического суверенитета. Выявлены системные технологические разрывы, локализованные преимущественно в нижних стратах производственной цепочки – производстве оптического волокна, базовых материалов и компонентной базы когерентных систем связи.

Применение методологии системного анализа позволяет не только диагностировать текущее состояние, но и прогнозировать траектории развития с учетом сложных взаимосвязей между технологическими, экономическими и институциональными факторами. Предложенный методический подход, интегрирующий методы стратификации, структурно-функционального и динамического анализа, создает основу для принятия обоснованных стратегических решений.

Дальнейшие исследования в данной области могут быть направлены на разработку формальных моделей системной динамики российского телекоммуникационного рынка, а также на создание инструментальной базы для сценарного прогнозирования с учетом различных вариантов внешнеполитической и экономической конъюнктуры.

Литература

1. Салютин Т.Ю. Методологические основы исследования рынка телекоммуникационных услуг и инноваций // Вестник университета. – 2008. – № 7 (17).

О возможностях и ограничениях системного анализа рынка...

2. В России запустили первое серийное производство базовых станций // Национальные проекты РФ. – 2025. – 23 декабря.
3. В России успешно передали 400G на 1400 км на действующей DWDM-сети // IKS MEDIA.RU. – 2025.
4. Группа компаний «Элемент» в 2025 году начнёт выпуск компонентов для базовых станций // echemistry.ru. – 2025.
5. Импортозамещение формирует новые правила развития отрасли телекоммуникаций // Российская газета. – 2025. – 3 декабря.
6. Кабмин утвердил план развития отрасли связи до 2035 года // SenatInform.ru. – 2025. – 27 мая.
7. Мультиагентный подход к прогнозированию динамики рынка телекоммуникационных услуг // CyberLeninka. – 2025.
8. Правительство утвердило мероприятия по развитию российской отрасли связи до 2035 года // 3DNews. – 2025. – 28 мая.
9. Российское оборудование для сетей связи оказалось китайским // Lenta.ru. – 2025. – 19 марта.
10. Рынок фиксированной связи в России достиг 94 млрд рублей: доля отечественного оборудования растёт на фоне импортозамещения // Cableman.ru. – 2025.
11. A System Dynamics Framework for Market Share Forecasting in the Telecommunications Market // MDPI. – 2025. – 30 ноября.

ON THE CAPABILITIES AND LIMITATIONS OF SYSTEM ANALYSIS OF THE TELECOMMUNICATIONS MARKET IN RUSSIA

Shipulin A. V. Skoltech

a.shipulin@skoltech.ru

Abstract. The article is devoted to developing a systems analytic approach to studying the telecommunications market in the Russian Federation under conditions of technological fragmentation of global supply chains, sanctions pressure, accelerated import substitution, and growing demands for technological sovereignty.

The relevance of the study is determined by the fact that the telecommunications industry in the modern economy serves not only as the infrastructural foundation of digital transformation but also as a critical element of national security, the stability of public administration, and the territorial connectivity of the country.

Based on the analysis of open industry, departmental, and expert sources for 2024–2025, the structural features of the Russian telecommunications equipment market have been identified. The level of localization across key segments has been assessed, and critical technological gaps have been revealed in the lower and middle tiers of the production chain – from raw materials for fiber optics to photonic and radio electronic component bases.

It is shown that the observed growth of domestic presence in the final segments of equipment assembly and integration does not eliminate the systemic vulnerability of the industry, as dependency persists at the level of preforms, high purity chemical compounds, active optical components, photonic integrated circuits, specialized substrates, and production platforms.

It is substantiated that traditional industry analysis – based on linear statistical interpretation of market indicators – is insufficient for an adequate description of the Russian telecommunications market as a complex adaptive system influenced by multidirectional technological, institutional, investment, and geoeconomic factors. In this context, a systems analysis methodology is proposed, integrating:

- stratification of technological processing stages;
- structural functional decomposition;
- scenario analysis;
- system dynamics methods;
- indicative monitoring of critical nodes.

The scientific novelty of the article lies in developing a multilayered model of the telecommunications systems market as a hierarchically organized technical economic system, where the stability of final market segments is determined by the state of deep technological contours.

A set of analytical indicators and control loops is proposed, enabling a transition from reactive import substitution policies to proactive management of technological development.

The practical significance of the work lies in the potential application of the proposed approach by government authorities, development institutions, telecom operators, and industrial companies when forming localization strategies, research and development programs, mechanisms of industry cooperation, and scenarios for long term development up to 2035.

Keywords: systems analysis, telecommunications systems, telecommunications market, technological sovereignty, import substitution, optoelectronics, photonics, DWDM, coherent communication systems, optical fiber, system dynamics, technological gaps.

References

1. Salyutina T. Yu. Methodological Foundations for Researching the Telecommunications Services Market and Innovations // University Bulletin. – 2008. – No. 7 (17).

О возможностях и ограничениях системного анализа рынка...

2. Russia Launches First Serial Production of Base Stations // National Projects of the Russian Federation. – 2025. – December 23.
3. Russia Successfully Transmits 400G over 1,400 km on an Operational DWDM Network // IKS MEDIA.RU. – 2025.
4. The «Element» Group of Companies to Start Producing Components for Base Stations in 2025 // echemistry.ru. – 2025.
5. Import Substitution Shapes New Rules for the Development of the Telecommunications Industry // Rossiyskaya Gazeta (Russian Newspaper). – 2025. – December 3.
6. The Cabinet of Ministers Approve a Plan for the Development of the Communications Industry until 2035 // SenatInform.ru. – 2025. – May 27.
7. Multi-Agent Approach to Forecasting the Dynamics of the Telecommunications Services Market // CyberLeninka. – 2025.
8. The Government Approve Measures for the Development of Russia's Communications Industry until 2035 // 3DNews. – 2025. – May 28.
9. Russian Telecommunications Equipment Turns Out to Be Chinese // Lenta.ru. – 2025. – March 19.
10. The Fixed-Line Communications Market in Russia Reaches 94 Billion Rubles: Share of Domestic Equipment Grows Amid Import Substitution // Cableman.ru. – 2025.
11. A System Dynamics Framework for Market Share Forecasting in the Telecommunications Market // MDPI. – 2025. – November 30.

Уважаемые Авторы!

Общие рекомендации по оформлению рукописей:

1. При подготовке электронной версии материалов используется редактор Microsoft Word for Windows.
2. Для файла статьи используется формат *.doc, *.docx.
3. Рисунки, формулы, таблицы и схемы располагаются по месту в тексте статьи. В виде отдельных файлов в формате .jpg наилучшего качества предоставляются рисунки и схемы. Названия файлов должны соответствовать нумерации и названиям соответствующих рисунков и схем в статье.
4. Статья не должна превышать объем более 20 стр. (свыше 20 стр. – по согласованию с редакцией), включая рисунки, схемы, таблицы и т.п.
5. При наборе используются **Times New Roman, 12, полуторный интервал, поля со всех сторон - 2,5 см. Отступ красной строки 1,25.**
6. При наборе текста используется только русский или английский языки без смешения русских и латинских букв в одном слове.
7. Таблицы создаются с использованием только редактора Word или Excel.
8. Формулы следует нумеровать в круглых скобках (например, (2)).
9. Библиографические ссылки оформляют по ГОСТ Р 7.9.5-2008, в тексте статьи заключают в квадратные скобки (например, [2]).

Файл рукописи должен включать в себя:

1. **УДК**
2. **ЗАГЛАВИЕ СТАТЬИ** на русском и перевод на английский язык. Заглавие должно быть информативным; в заглавии статьи можно использовать только общепринятые сокращения; в переводе заглавия на английский язык допускается транслитерация с русского языка только непереводаемых названий собственных имен, приборов и др. объектов, имеющих собственные названия.
3. **Фамилия, имя, отчество** автора (авторов) на русском и английском языках. Указывается ученая степень, звание и должность автора.
4. **Адресные сведения авторов**, включающие электронный адрес для переписки, телефон для оперативной связи, наименование организации (ведомства), город и страну. Также дается официальное наименование организации на английском языке.
5. **Аннотация** на русском и английском языках. Объем текста аннотации определяется содержанием публикации (объемом сведений, их научной ценностью и/или практическим значением), должен быть не менее 100–250 слов.
6. **Ключевые слова** на русском и английском языках.
7. **Текст статьи.**
8. Пристатейный **список литературы** должен быть представлен двумя вариантами для русскоязычного и англоязычного блока. **Для русскоязычного блока** список приводится в следующем порядке: сначала источники на русском языке в алфавитном порядке (оформление согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008), затем англоязычные источники также в алфавитном порядке, затем ссылки на интернет-источники в порядке появления в тексте, например:
 1. Кравцов В.А. Массы атомов и энергии связи ядер. -М.: Атомиздат, 1974. -344 с.
 2. Магницкий Н.А. Теория сжимаемого осциллирующего эфира// Сложные системы. - 2018. -№ 4 (29). - С. 4-24.
 3. Magnitskii N.A. Theory of compressible oscillating ether // Results in Physics. - 2019. - No. 12. - P. 1436-1445.
 4. URL: <https://periodictable.com/Isotopes/> (дата обращения 01.08.2019).
9. **Для англоязычного блока (References)** сохраняется та же нумерация, что и в русскоязычном блоке, при этом источники на русском языке должны быть представлены в романском алфавите (при транслитерации используется стандарт **Board of Geographic Names (BGN)** с помощью программы <https://translit.ru/ru/Bgn/>) с переводом названия статьи и источника,

приведенными в квадратных скобках, например:

1. Kravtsov У.А. Massy atomov i energii svyazi yader [Оригинальный перевод названия на англ.яз]. М.: Atomizdat. 1974. 344 p.
2. Magnitskii N.A. Teoriya szhimayemogo ostsilliruyushchego efira [Оригинальный перевод названия статьи на англ.яз]. *Slozhnyye systemy [The complex systems]*. 2018. No. 4 (29). P. 4-24.
3. Magnitskii N.A. Theory of compressible oscillating ether. *Results in Physics*. 2019. No. 12. P. 1436-1445.
4. URL: <https://periodictable.com/Isotopes/> (appeal date 01.08.2019).

Англоязычный блок полностью (название статьи, ФИО автора, официальное наименование организации, аннотация, ключевые слова, ссылки) размещается после текста статьи на русском языке.

Желаем плодотворной работы!

Подписано в печать 04.06.2025

Формат А4. Бумага офсетная.

Печать цифровая.

Тираж 50 экз. Цена договорная.

Отпечатано в типографии ООО РПК «ВАШ ФОРМАТ»

Адрес: 115419, г. Москва, Малая Калужская, 15, корпус 17

Тел. 7 (495) 749-45-84