УДК 338.45
JEL O14, O33, Q55

КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ЦИФРОВОЙ ЗРЕЛОСТИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭКОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ЦИРКУЛЯРНОЙ ЭКОНОМИКИ[1]

Мельник Алексей Вадимович, асп., аналитик
Бабкин Александр Васильевич, канд. техн. наук, докт. экон. наук, проф.
Филатчев Алексей Дмитриевич, маг.

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, литера Б, Санкт-Петербург, Россия, 195251; e-mail: alexey55557@mail.ru

Предмет: переход промышленных экосистем к циркулярной экономике требует инструментов оценки цифровой зрелости, учитывающих сетевые эффекты замкнутых ресурсных циклов. Существующие модели сфокусированы на отдельных предприятиях и не охватывают синергию симбиотических связей. *Цель*: разработка комплексной модели оценки цифровой зрелости высокотехнологичной промышленной экосистемы в условиях циркулярной экономики. *Дизайн исследования*: модель построена на синтезе системного анализа, индексного метода и квалиметрии. Девять субпотенциалов объединены в контуры Цифрового Потенциала (ресурсная база) и Цифрового Форсайта (стратегические возможности). Промышленный симбиоз введён как сквозное ядро, пронизывающее четыре оценочных блока. Биотехнологический субпотенциал разделён на ресурсную и инновационную составляющие. Данные собирались двумя путями: опрос экспертов (n = 22, W Кендалла = 0,68) и количественные метрики предприятий. Агрегирование – средняя взвешенная арифметическая, верификация – средняя геометрическая. Результаты. Апробация проведена на материалах кластера чистых технологий Санкт-Петербурга и экоиндустриального парка «Тельмана» (коэффициент кооперации 0,47). Получены ИЦЗ = 0,72 («Высокий» уровень), ИЦП = 0,735, ИЦФ = 0,686. Профилирование выявило узкое место – экосистемный субпотенциал (0,47) при организационно-управленческом 0,89. Разница между арифметической и геометрической оценками – менее 0,1%. Подготовлена дорожная карта с целевым ИЦЗ ≥ 0,85. Новизна – встраивание симбиоза как сквозного ядра и дифференциация биотехнологического субпотенциала.

[1] Исследование выполнено за счет средств гранта РНФ № 25-18-00978.

Ключевые слова: цифровая зрелость, промышленная экосистема, промышленный симбиоз, модель оценки, субпотенциал, цифровой потенциал, цифровой форсайт, циркулярная экономика.

DOI: 10.17308/meps/2078-9017/2026/8/51-68

Введение

Развитие промышленности сегодня задаётся двумя мощными сдвигами – сплошной цифровизацией и жёстким запросом на ресурсную эффективность. Концепция Industry 5.0 прибавляет к технологиям четвёртой революции человеческое измерение и экологическую повестку, постепенно вытесняя линейные производственные цепочки замкнутыми экосистемами [1]. В центре таких экосистем находится промышленный симбиоз: отходы и побочные продукты одного предприятия становятся сырьём для другого. По сути, в симбиозе циркулируют четыре вида потоков – материальные (вторичное сырьё, отходы, побочные продукты), энергетические (пар, тепло, электричество из отходов), информационные (обмен данными, цифровые платформы) и организационные (общая инфраструктура, механизмы координации) [2].

В трудах ряда исследователей [4, 5] промышленные экосистемы рассматриваются как «локализованные социально-экономические формации, обеспечивающие устойчивое развитие посредством циркуляции ресурсов в целевой, экологической, технологической и проектной подсистемах».

В экосистеме возникает эмерджентный эффект: устойчивость целого оказывается выше суммы устойчивостей отдельных частей за счёт синергии, перекрёстного субсидирования и кросс-платформенных взаимодействий. Циркуляция ресурсов (материальных, энергетических, информационных, кадровых) в такой системе приближается к природным биогеохимическим циклам, что и дало основание для использования биологической метафоры «экосистема».

Несмотря на растущее число кластерных и экоиндустриальных инициатив, существует дефицит измерительных инструментов, способных комплексно оценить глубину цифровой интеграции симбиотических связей. Традиционные модели цифровой зрелости (например, IMPULS, Acatech) сфокусированы на уровне отдельного предприятия и игнорируют сетевые эффекты обмена ресурсами [6]. Показатели циркулярной экономики, в свою очередь, слабо отражают цифровую составляющую [7].

Цель исследования – разработка комплексной модели оценки цифровой зрелости промышленной экосистемы в условиях циркулярной экономики.

Для достижения цели решаются задачи: (1) обоснование архитектуры модели и её ключевых структурных элементов; (2) операционализация четырёх оценочных блоков через систему субпотенциалов и показателей; (3) выявление взаимосвязей между блоками и синергетических эффектов; (4) апробация модели на реальном объекте.

Объект исследования – высокотехнологичная промышленная экосистема, функционирующая на принципах промышленного симбиоза.

Предмет исследования – структурные элементы, взаимосвязи и метрики комплексной модели оценки цифровой зрелости промышленной экосистемы.

Методы и результаты исследования

Методологический каркас исследования образует синтез системного анализа, индексного метода и квалиметрии. Построение модели осуществлялось по принципу «от общего к частному»: сначала сформировано концептуальное ядро, затем оно декомпозировано на блоки, субпотенциалы и оценочные метрики.

Модель включает девять субпотенциалов, объединённых в два контура: Цифрового Потенциала (материально-технический, финансово-экономический, инфраструктурный, кадровый, биотехнологический ресурсный) и Цифрового Форсайта (организационно-управленческий, инновационный, экосистемный сетевой, биотехнологический инновационный). Промышленный симбиоз выступает сквозным содержательным ядром, пронизывающим все четыре оценочных блока. Принципиальным отличием модели является дифференциация биотехнологического субпотенциала на ресурсный и инновационный аспекты, что обусловлено разнородной природой оцениваемых объектов: материальных потоков вещества и энергии, с одной стороны, и нематериальных активов научно-технологического потенциала – с другой [8].

Сбор данных осуществляется из двух источников: экспертные оценки ($n \geq 18$, коэффициент конкордации Кендалла $W \geq 0,6$) и количественные метрики предприятий. Показатели нормируются к шкале [0; 1], агрегируются методом средней взвешенной арифметической. Итоговый индекс цифровой зрелости рассчитывается как ИЦЗ = ИЦП × 0,7 + ИЦФ × 0,3 с последующей верификацией методом средней взвешенной геометрической (порог расхождения – 5%). Апробация проведена на примере Санкт-Петербургского кластера чистых технологий и проекта экоиндустриального парка «Тельмана» [9].

Концептуальная архитектура модели.

Под цифровой зрелостью промышленной экосистемы понимается комплексное состояние, характеризующее глубину и системность интеграции цифровых технологий, данных и управленческих практик во все ключевые процессы экосистемы, включая координацию материальных, энергетических и информационных потоков между участниками промышленного симбиоза. Количественно данный уровень измеряется с помощью интегрального индекса цифровой зрелости (ИЦЗ), который агрегирует оценки по девяти субпотенциалам, объединённым в контуры цифрового потенциала и цифрового форсайта.

Ядром модели является промышленный симбиоз как содержательная

основа, пронизывающая все уровни оценки (рис. 1). Именно он определяет специфику циркуляции материальных, энергетических и информационных потоков между участниками экосистемы и, как следствие, состав и структуру оценочных показателей. Вокруг ядра выстроены четыре взаимосвязанных блока:

- Блок 1 «Зрелость цифровой инфраструктуры и технологий»;
- Блок 2 «Зрелость промышленного симбиоза и ресурсных потоков»;
- Блок 3 «Зрелость интеллектуального капитала и управления знаниями»;
- Блок 4 «Зрелость организационно-управленческого контура».

Каждый блок операционализируется через систему субпотенциалов. Всего выделено девять субпотенциалов, объединённых в два контура:

1. Контур Цифрового Потенциала (ресурсная база) – отражает текущий уровень материальных, финансовых, кадровых и технологических ресурсов: материально-технический, финансово-экономический, инфраструктурный, кадровый, биотехнологический (ресурсный).

2. Контур Цифрового Форсайта (стратегические возможности) – характеризует способность к развитию и инновациям: организационно-управленческий, инновационный, экосистемный (сетевой), биотехнологический (инновационный).

Внутри контура Цифрового Потенциала биотехнологический субпотенциал рассматривается с ресурсной стороны – по тому, как работают замкнутые циклы прямо сейчас: сколько вторичного сырья возвращается в оборот, каковы объёмы переработанных отходов, какая доля энергии получена из отходов. Эти цифры показывают тот уровень циркулярности, которым экосистема уже обладает.

В контуре Цифрового Форсайта тот же субпотенциал повёрнут инновационной гранью – во внимание берутся заделы на будущее: число патентов, запущенных пилотных проектов, объём вложений в новые зелёные технологии. Здесь оценивается не текущая эффективность, а способность экосистемы развиваться дальше.

Разносить эти две грани по разным контурам приходится потому, что экологическая результативность и инновационный багаж не всегда идут рука об руку. В практике нередко встречается картина, когда с переработкой отходов всё благополучно (ресурсная часть высокая), а портфель новых разработок почти пуст (инновационная часть низкая). Если слить обе грани в одном субпотенциале, общий профиль смажется и стратегические риски останутся незамеченными. Проведённая апробация как раз дала такой расклад: ресурсная составляющая – 0,73, инновационная – 0,55.

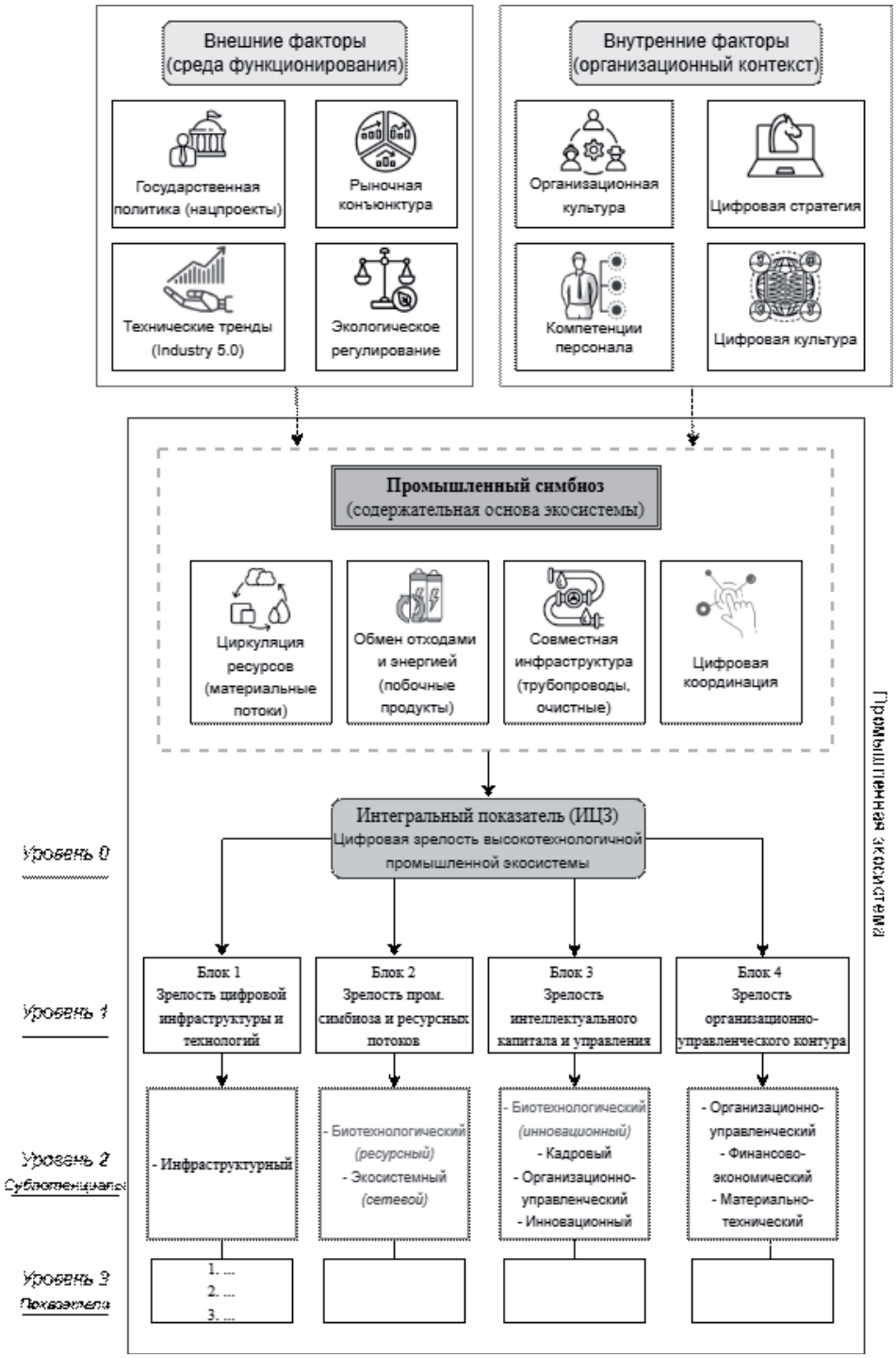

Рис. 1. Структура комплексной модели оценки цифровой зрелости высокотехнологичной промышленной экосистемы (разработано авторами)

Главное, что отличает модель – разделение биотехнологического субпотенциала на ресурсную и инновационную ветви. Первая ветвь фиксирует, насколько результативно работают замкнутые циклы и утилизация отходов в данный момент, вторая – какой задел создаётся под будущие зелёные технологии. Причина такого разделения кроется в двойственной природе экологических инноваций: это и операционная отдача сегодня, и стратегический фундамент на годы вперёд. Смешай обе ветви в одном показателе – и общая картина исказится; например, высокая переработка отходов заслонит пустую инновационную «полку», а это уже риск.

Ещё одна особенность – субпотенциалы не привязаны к блокам жёстко, часть из них обслуживает сразу несколько блоков. Скажем, организационно-управленческий субпотенциал участвует и в Блоке 3 (интеллектуальный капитал), и в Блоке 4 (организационно-управленческий контур), потому что работает и как часть культуры обмена знаниями, и как стратегический координационный механизм.

Иерархия модели выстроена по уровням (рис. 1): верхний, нулевой уровень – это сводный ИЦЗ, первый уровень образуют четыре блока, второй – девять субпотенциалов, третий – конкретные показатели.

Модель не существует в вакууме – она учитывает внешние и внутренние факторы, которые задают рамки всей оценки. К внешним факторам (верхний слой модели) отнесены государственная политика с её национальными проектами, рыночная ситуация, технологические тренды (Industry 5.0) и экологическое регулирование, включая ESG-требования. Они очерчивают институциональное поле, в котором работает экосистема, и во многом определяют направление её цифрового сдвига.

Внутренние факторы (нижний слой модели) – это организационная культура, цифровая стратегия участников, компетенции персонала и цифровая культура. Именно они создают ту организационную и поведенческую среду, в которой разворачивается цифровая трансформация, и от них зависит, насколько экосистема готова к переменам. В итоге модель стыкует объективные внешние условия и субъективные внутренние предпосылки, что и придаёт диагностике целостность.

Система показателей. Подбор метрик осуществлялся с учётом принципов релевантности, измеримости и связи с симбиотическими процессами. Для всех блоков сформированы наборы показателей, сочетающие количественные и экспертные оценки. Полная спецификация показателей (уровень 3) с методами оценки и единицами измерения приведена в Приложении (табл. 8). Из 27 индикаторов 7 выделены как непосредственно характеризующие промышленный симбиоз. Ниже представлено краткое описание каждого блока и соответствующие таблицы ключевых показателей (табл. 1–4).

Блок 1 «Зрелость цифровой инфраструктуры и технологий» отражает технологический фундамент цифровой трансформации экосистемы, включая ИТ-архитектуру, сквозные цифровые технологии и платформенные ре-

шения. Цифровой фундамент необходим для отслеживания ресурсных потоков симбиоза в реальном времени.

Таблица 1

Ключевые показатели блока 1

Показатель	Описание	Метод оценки
Уровень автоматизации производства	Доля производственных процессов, автоматизированных с использованием цифровых систем управления	Количественный (паспорта оборудования, отчёты MES/SCADA)
Наличие и интеграция ERP-систем	Степень интеграции корпоративных информационных систем между участниками экосистемы	Экспертная оценка (анкетирование)
Пропускная способность сетей	Скорость передачи данных между участниками экосистемы	Количественный (отчёты ИТ-служб)
Количество IoT-датчиков на единицу оборудования	Плотность сенсорной инфраструктуры для мониторинга ресурсных потоков	Количественный
Использование облачных сервисов	Доля участников, использующих облачные платформы для обмена данными	Экспертная оценка
Применение технологий ИИ	Использование искусственного интеллекта для прогнозирования и оптимизации потоков	Экспертная оценка
Наличие цифровых двойников	Степень внедрения цифровых двойников для моделирования симбиотических связей	Экспертная оценка
Соответствие субпотенциалам: Инфраструктурный.		

Блок 2 «Зрелость промышленного симбиоза и ресурсных потоков» концентрирует ключевые циркулярные метрики: долю вторичных ресурсов, объёмы переработанных отходов, эффективность замкнутых материальных потоков, долю энергии из отходов, плотность симбиотических связей, коэффициент кооперации и специально сконструированный Индекс цифровой связности экосистемы (EDCI). EDCI агрегирует долю автоматизированных транзакций, наличие стандартизированных API и скорость обмена данными, тем самым отражая цифровую координацию симбиоза. Зрелость промышленного симбиоза и ресурсных потоков характеризует способность экосистемы к организации замкнутых циклов и эффективному обмену ресурсами между участниками.

Таблица 2

Ключевые показатели блока 2

Показатель	Описание	Метод оценки
Доля вторичных ресурсов в производственном цикле	Объём использованных вторичных ресурсов относительно общего объёма сырья	Количественный (договоры, накладные)
Объёмы переработанных отходов	Масса отходов, переработанных в рамках симбиотических связей	Количественный (отчёты экологов)
Эффективность замкнутых материальных потоков	Коэффициент циркулярности ресурсных потоков в экосистеме	Количественный
Доля энергии, произведённой из отходов	Объём энергии, полученной из отходов, относительно общего энергопотребления	Количественный

Продолжение табл. 2

Показатель	Описание	Метод оценки
Плотность симбиотических связей	Количество устойчивых парных связей между участниками экосистемы	Количественный (анализ договоров)
Коэффициент кооперации	Отношение числа совместных проектов к общему числу участников	Количественный
Индекс цифровой связности экосистемы (EDCI)	Доля автоматизированных транзакций, наличие стандартизированных API, скорость обмена данными	Количественный + экспертный
Соответствие субпотенциалам: Биотехнологический (ресурсный), Экосистемный (сетевой).		

Блок 3 «Зрелость интеллектуального капитала и управления знаниями» оценивает долю ИТ-специалистов, охват программами переподготовки, индекс цифровых компетенций, наличие системы управления знаниями, культуру обмена знаниями и степень data-driven-подхода к решениям. Зрелость интеллектуального капитала и управления знаниями отражает человеческий и когнитивный потенциал экосистемы, необходимый для эффективной цифровой трансформации.

Таблица 3

Ключевые показатели блока 3

Показатель	Описание	Метод оценки
Доля ИТ-специалистов	Численность ИТ-персонала относительно общего числа сотрудников	Количественный (отчёты HR)
Охват программами переподготовки	Доля сотрудников, прошедших обучение цифровым компетенциям	Количественный
Индекс цифровых компетенций	Средний уровень владения цифровыми инструментами по результатам аттестаций	Экспертная оценка
Наличие системы управления знаниями	Функциональность и степень использования платформы для обмена знаниями	Экспертная оценка
Культура обмена знаниями	Готовность участников к совместному обучению и передаче опыта	Экспертная оценка
Data-driven-подход к принятию решений	Степень использования аналитики данных для оптимизации симбиотических связей	Экспертная оценка
Соответствие субпотенциалам: Кадровый, Организационно-управленческий (часть), Инновационный (часть).		

Блок 4 «Зрелость организационно-управленческого контура» фокусируется на формализации стратегии, наличии координационного центра (брокера симбиоза), инвестициях в совместную инфраструктуру, доле затрат на НИОКР, количестве патентов и пилотных проектов, гибкости оргструктуры и коэффициенте синергетической эффективности цифровых инвестиций (DISR), который отражает экономическую отдачу от общих цифровых решений. Зрелость организационно-управленческого контура характеризует способность экосистемы к стратегическому управлению цифровой трансформацией.

Таблица 4

Ключевые показатели блока 4

Показатель	Описание	Метод оценки
Наличие цифровой стратегии	Степень формализации и реализации стратегии цифровой трансформации	Экспертная оценка
Наличие координационного центра	Существование брокера симбиоза или аналогичной структуры	Экспертная оценка
Инвестиции в совместную инфраструктуру	Объём инвестиций в цифровые проекты, реализуемые совместно участниками	Количественный
Доля затрат на НИОКР в структуре расходов	Интенсивность инновационной деятельности	Количественный (финансовая отчётность)
Количество патентов и пилотных проектов	Результативность инновационной активности	Количественный
Гибкость организационной структуры	Скорость принятия решений и адаптации к изменениям	Экспертная оценка
Коэффициент синергетической эффективности цифровых инвестиций (DISR)	Отношение совокупного эффекта от общих цифровых решений к объёму инвестиций	Количественный + экспертный
Соответствие субпотенциалам: Организационно-управленческий, Финансово-экономический, Материально-технический.		

Таблица 5

Детализация показателей оценки цифровой зрелости по блокам комплексной модели (разработано авторами)

Блок модели (уровень 1)	Субпотенциал (уровень 2)	Показатель (уровень 3)	Единица измерения	Метод оценки	Связь с симбиозом
Блок 1. Зрелость цифровой инфраструктуры и технологий	Инфраструктурный	1. Уровень автоматизации производства	%	Количественный	Обеспечивает цифровую основу для отслеживания потоков симбиоза
		2. Наличие и интеграция ERP-систем	балл (0–5)	Экспертная оценка	Интеграция данных между участниками симбиоза
		3. Пропускная способность сетей	Мбит/с	Количественный	Скорость обмена данными о ресурсных потоках
		4. Количество IoT-датчиков	шт./ед. оборудования	Количественный	Мониторинг потоков отходов и ресурсов в реальном времени
		5. Использование облачных сервисов	% участников	Экспертная оценка	Доступность данных для всех участников
		6. Применение технологий искусственного интеллекта	балл (0–5)	Экспертная оценка	Оптимизация симбиотических связей
		7. Наличие цифровых двойников	балл (0–5)	Экспертная оценка	Моделирование замкнутых циклов

Продолжение табл. 5

Блок модели (уровень 1)	Субпотенциал (уровень 2)	Показатель (уровень 3)	Единица измерения	Метод оценки	Связь с симбиозом
Блок 2. Зрелость промышленного симбиоза и ресурсных потоков	Биотехнологический (ресурсный)	1. Доля вторичных ресурсов в производственном цикле	%	Количественный	Ключевой показатель симбиоза
		2. Объёмы переработанных отходов	тонн/год	Количественный	Ключевой показатель симбиоза
		3. Эффективность замкнутых материальных потоков	%	Количественный	Ключевой показатель симбиоза
	Экосистемный (сетевой)	4. Доля энергии, произведённой из отходов	%	Количественный	Ключевой показатель симбиоза
		5. Плотность симбиотических связей	кол-во связей	Количественный	Ключевой показатель симбиоза
		6. Коэффициент кооперации	ед.	Количественный	Ключевой показатель симбиоза
		7. Индекс цифровой связности экосистемы (EDCI)	ед. (0–1)	Комбинированный	Ключевой показатель симбиоза
Блок 3. Зрелость интеллектуального капитала и управления знаниями	Кадровый	1. Доля ИТ-специалистов	%	Количественный	Обеспечивает цифровую компетентность для управления симбиозом
		2. Охват программами переподготовки	%	Количественный	Повышение компетенций в области симбиоза
		3. Индекс цифровых компетенций	ед. (0–1)	Экспертная оценка	Готовность персонала к цифровому взаимодействию
	Организационно-управленческий	4. Наличие системы управления знаниями	балл (0–5)	Экспертная оценка	Накопление и передача опыта симбиоза
		5. Культура обмена знаниями	балл (0–5)	Экспертная оценка	Доверие и открытость между участниками
	Инновационный	6. Data-driven-подход к принятию решений	балл (0–5)	Экспертная оценка	Использование данных для оптимизации симбиоза
Блок 4. Зрелость организационно-управленческого контура	Организационно-управленческий	1. Наличие цифровой стратегии	балл (0–5)	Экспертная оценка	Стратегическое управление симбиозом
		2. Наличие координационного центра (брокера симбиоза)	балл (0–5)	Экспертная оценка	Ключевой организационный элемент симбиоза
		3. Гибкость организационной структуры	балл (0–5)	Экспертная оценка	Способность адаптироваться к новым связям

Окончание табл. 5

Блок модели (уровень 1)	Субпотенциал (уровень 2)	Показатель (уровень 3)	Единица измерения	Метод оценки	Связь с симбиозом
	Финансово-экономический	4. Инвестиции в совместную инфраструктуру	млн руб.	Количественный	Финансовая основа симбиоза
		5. Доля затрат на НИОКР в структуре расходов	%	Количественный	Инновационное развитие симбиоза
		6. Коэффициент синергетической эффективности цифровых инвестиций (DISR)	ед.	Комбинированный	Экономический эффект симбиоза
	Материально-технический	7. Количество патентов и пилотных проектов	шт.	Количественный	Инновационная активность в области симбиоза

Примечание к таблице: методы оценки показателей: количественный (данные из отчётности, паспортов оборудования, систем MES/SCADA, HR-отчётов, финансовой документации); экспертная оценка (анкетирование членов экспертной группы); комбинированный (сочетание количественных данных и экспертных суждений). Все показатели проходят процедуру нормирования (этап 4 алгоритма) для приведения к шкале [0;1]. Выделенные показатели (курсивом) непосредственно характеризуют промышленный симбиоз.

Взаимосвязь блоков и синергетические эффекты. Предложенная модель носит интеграционный характер: все четыре блока находятся в тесной взаимосвязи, будучи расположены вокруг ядра – промышленного симбиоза (рис. 1). Блок 1 обеспечивает технологическую основу для мониторинга ресурсных потоков и обмена данными (блок 2), обучения персонала (блок 3) и принятия управленческих решений (блок 4). В свою очередь, именно потоки отходов и энергии (блок 2) определяют, какие цифровые решения востребованы; компетенции персонала (блок 3) создают базу для их реализации; стратегическое управление (блок 4) направляет инвестиции в приоритетные направления. Синергетический эффект, возникающий на стыке блоков, не сводится к сумме отдельных оценок и является главным предметом измерения модели.

Расчёт интегрального показателя. Расчёт итогового ИЦЗ базируется на последовательном агрегировании: нормированные показатели → субпотенциалы → индексы контуров → итоговый индекс. Ключевые формулы:

1) Нормирование: $N_i = X_i / X_{max}$ (стимулирующие) или $N_i = X_{min} / X_i$ (дестимулирующие).

2) Субпотенциал: $SP_j = \Sigma (N_{ij} \times w_{ij})$.

3) Индексы контуров: $ИЦП = \Sigma (SP_j \times w_j)$, j = 1...5; $ИЦФ = \Sigma (SP_j \times w_j)$, j = 1...4.

4) Итоговый ИЦЗ: $ИЦЗ = ИЦП \times 0,7 + ИЦФ \times 0,3$.

Интерпретация ИЦЗ осуществляется по пятиуровневой шкале (табл. 6).

Таблица 6

Интерпретация ИЦЗ по шкале зрелости

Уровень зрелости	Диапазон ИЦЗ	Характеристика
Очень высокий	0,85 – 1,00	Полная интеграция, высокая синергия
Высокий	0,70 – 0,85	Системная цифровизация, сбалансированное развитие
Выше среднего	0,50 – 0,70	Активная трансформация, наличие диспропорций
Средний	0,30 – 0,50	Фрагментарная цифровизация
Низкий	0,10 – 0,30	Начальный этап, отсутствие системного подхода

Интерпретация ИЦЗ опирается на квалиметрическую шкалу. Уровень «Низкий» (0,1–0,3) сигнализирует о фрагментарной цифровизации; «Средний» (0,3–0,5) – о нереализованном потенциале; «Выше среднего» (0,5–0,7) – об активной трансформации с отдельными диспропорциями; «Высокий» (0,7–0,85) – о системной цифровизации и устойчивых сетевых эффектах; «Очень высокий» (0,85–1,0) – о лидирующих позициях с полной интеграцией процессов.

Декомпозиция блоков модели. Для системного представления взаимосвязей между выделенными субпотенциалами и ключевыми аспектами функционирования экосистемы в таблице 6 представлена декомпозиция блоков модели по субпотенциалам и этапам алгоритма оценки (детально алгоритм описан в сопутствующей публикации [8]).

Таблица 7

Декомпозиция блоков модели по субпотенциалам и этапам алгоритма

Блок интеграционной модели	Соответствующие субпотенциалы	Соответствующие этапы алгоритма
Блок 1. Зрелость цифровой инфраструктуры и технологий	Инфраструктурный	3–4, 6–8
Блок 2. Зрелость промышленного симбиоза и ресурсных потоков	Биотехнологический (ресурсный), Экосистемный (сетевой)	5, 10
Блок 3. Зрелость интеллектуального капитала и управления знаниями	Кадровый, Организационно-управленческий, Инновационный	2, 5, 10
Блок 4. Зрелость организационно-управленческого контура	Организационно-управленческий, Финансово-экономический, Материально-технический	1, 11–12

Для проверки модели взяли Санкт-Петербургский кластер чистых технологий для городской среды, насчитывающий больше 60 участников. Кластер ведёт проекты по энергоэффективности, переработке отходов и зелё-

ным технологиям; коэффициент кооперации держится на отметке 0,47, что говорит о сложившихся симбиотических связях [8]. Самый показательный пример – экоиндустриальный парк в промзоне «Тельмана» (Ленинградская область). Там отходы в виде крупногабаритных шин превращают в тепло и электроэнергию для нужд резидентов парка. Благодаря такой схеме выбросы парниковых газов удаётся сократить до 90 процентов, а объём захоронения отходов – до 80 процентов. После обработки данных по участникам «Тельмана» получились следующие цифры. Итоговый индекс цифровой зрелости вышел на 0,72 – это «Высокий» уровень (табл. 5).

Индекс цифрового потенциала (ресурсный контур) – ИЦП = 0,735, индекс цифрового форсайта (стратегический контур) – ИЦФ = 0,686.

В таблице 8 приведены значения всех девяти субпотенциалов, сгруппированных по контурам.

Таблица 8

Значения субпотенциалов цифровой зрелости экосистемы кластера «Тельмана»

Контур	Субпотенциал	Значение	Уровень
Цифровой Потенциал (ИЦП = 0,735)	Материально-технический	0,83	Высокий
	Финансово-экономический	0,70	Высокий
	Инфраструктурный	0,68	Выше среднего
	Кадровый	0,63	Выше среднего
	Биотехнологический (ресурсный)	0,73	Высокий
Цифровой Форсайт (ИЦФ = 0,686)	Организационно-управленческий	0,89	Очень высокий
	Инновационный	0,60	Выше среднего
	Экосистемный (сетевой)	0,47	Средний
	Биотехнологический (инновационный)	0,55	Выше среднего
ИЦЗ итоговый		0,72	Высокий

Профилирование субпотенциалов выявило значительную асимметрию. Наиболее сильными сторонами являются организационно-управленческий субпотенциал (0,89 – «Очень высокий») и материально-технический (0,83 – «Высокий»), что отражает высокий уровень координации и технологической оснащённости. Биотехнологический (ресурсный) субпотенциал (0,73) подтверждает эффективность замкнутых циклов. Наиболее критичным «узким местом» является экосистемный (сетевой) субпотенциал (0,47 – «Средний»), а именно Индекс цифровой связности экосистемы (EDCI): лишь 25% транзакций автоматизированы, отсутствуют единые стандарты API.

Высокий экологический эффект симбиоза не подкреплён адекватной цифровой координацией.

Заключение

Научная новизна полученной модели заключается в нескольких аспектах, приведённых ниже.

1. Промышленный симбиоз не вынесен в отдельный блок (как это часто делается в моделях циркулярной зрелости [9]), а пропущен через все четыре компонента как смысловая ось. За счёт этого цифровые сигналы улавливаются на стыках: видны не только прямые метрики симбиоза из Блока 2, но и то, как цифровая инфраструктура (Блок 1) обслуживает потоки ресурсов, как компетенции людей (Блок 3) работают на их оптимизацию и как стратегия (Блок 4) встраивает симбиотические приоритеты в общий курс.

2. Разделение биотехнологического субпотенциала на ресурсную и инновационную части снимает давнюю методическую трудность: экологическая эффективность и инновационные заделы часто движутся в разные стороны, а их смешивание размывает картину. Построенная модель позволила зафиксировать ситуацию, когда текущая переработка отходов находится на высоком уровне (ресурсная часть – 0,73), а портфель будущих технологий пока набирает лишь средние баллы (инновационная часть – 0,55). Для долгосрочной устойчивости это серьёзный сигнал.

3. Двухконтурная схема (потенциал – форсайт) даёт объёмный взгляд: текущее состояние (ИЦП = 0,735) и стратегические возможности (ИЦФ = 0,686) видны по отдельности. В нашем случае ресурсная база чуть обгоняет стратегический контур, а значит, надо подтягивать инновационную и сетевую составляющие.

4. Нежёсткая привязка субпотенциалов к блокам (один и тот же организационно-управленческий субпотенциал участвует в двух блоках) отражает реальную сложность экосистемных взаимодействий, где один фактор может играть несколько ролей одновременно.

Практическая отдача от модели подтверждена апробацией. Низкий экосистемный субпотенциал (0,47) прямо говорит о том, что кластеру нужна единая цифровая платформа. Разрыв между организационно-управленческим (0,89) и экосистемным (0,47) субпотенциалами показывает: координационные механизмы прописаны, а вот цифровой инструмент для них пока отстаёт – типичная проблема цифровой устойчивости промышленных систем [11].

Среди ограничений модели стоит назвать её статичность (срез на конкретную дату) и чувствительность к составу и квалификации экспертной группы. Чтобы укрепить выводы, выборку надо расширять за счёт кластеров из других регионов и отраслей.

Построенная модель даёт работающий инструмент для диагностики цифровой зрелости промышленной экосистемы, действующей в логике циркулярной экономики. Её ключевые черты: (1) промышленный симбиоз поставлен в центр и проходит через все блоки; (2) архитектура двухконтурная – ресурсная база и стратегические возможности разделены; (3) биотехнологический субпотенциал разведён на ресурсный и инновационный

аспекты; (4) субпотенциалы не закреплены за блоками намертво, что передаёт реальную сложность экосистемных связей; (5) в основе лежат 27 показателей, которые переводят каждый аспект зрелости в измеряемую плоскость; (6) внешние и внутренние факторы учтены как контекст, в котором проводится оценка.

Практическая ценность подтверждена апробацией на кластере чистых технологий: модель позволила агрегировать оценку в единый ИЦЗ = 0,72 («Высокий» уровень) и локализовать экосистемный субпотенциал (0,47) как узкое место. Дальнейшие исследования целесообразно направить на интеграцию модели с ESG-рейтингами [3], перспективными технологическими трендами, включая применение искусственного интеллекта для предиктивной аналитики симбиотических связей [12] и для возможности прогнозировать ИЦЗ в зависимости от сценарных параметров, а также на учёт факторов кибербезопасности промышленных экосистем[1] и мониторинг инцидентов с ИИ в промышленности[2]. Актуальность этого направления подтверждается глобальными прогнозами трансформации рынка труда[3] и развитием моделей цифровой зрелости для сложных организационных систем[4]. Такой подход усилит роль цифровой связности как фактора устойчивого развития промышленных экосистем.

Список источников

1. Бабкин А.В., Мельник А.В., Дин Хайци. Подходы и методы оценки цифровой зрелости интеллектуальных промышленных систем в экономике данных // *Вестник Академии знаний*, 2025, no. 4 (69), с. 47–57.

2. Иванов Д.Ю., Петрова Л.И. Цифровая устойчивость промышленных систем в условиях импортозамещения // *Информационные технологии в бизнесе*, 2022, no. 3 (45), с. 12–25.

3. Ефимова О.В., Рожнова О.В. Стратегия гармонизации финансовой и нефинансовой отчетности в области раскрытий климатических рисков // *Учёт. Анализ. Аудит*, 2020, Т. 7, no. 3, с. 18–25.

4. Клейнер Г.Б. Промышленные экосистемы: взгляд в будущее // *Экономическое возрождение России*, 2018, no. 2, с. 53–62.

5. Кудрявцева О.В., Яковлева Е.Ю. Экоиндустриальные парки как драйверы циркулярной экономики // *Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика*, 2023, т. 39, вып. 2, с. 312–330.

6. Мельник А.В. Актуальные вопросы и социально-экономические перспективы в России и мире в условиях геоэкономических, технологических и экологических трансформаций // *Научный альманах Центрального Черноземья*, 2022, no. 1-9, с. 214–220.

7. Мельник А.В., Бабкин А.В., Михайлов П.А., Трапезникова А.М. Биотехнологический субпотенциал цифрового промышленного предприятия и экосистемы в контексте ESG // *Естественно-гуманитарные исследования*, 2025, no. 3 (59), с. 341–349.

8. Толстых Т.О., Шмелёва Н.В., Агаева А.М. Модели оценки зрелости промышленных экосистем // *Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе*, 2021, no. 1, с. 5–20.

[1] World Economic Forum. The Future of Jobs Report 2025. Geneva, WEF, 2025. 296 p.

[2] АНО «Цифровая экономика». Мониторинг инцидентов с ИИ в промышленности: аналитический отчёт. М., 2025. 48 с.

[3] Group-IB. Hi-Tech Crime Trends 2024: Industrial Cybersecurity Report. Singapore, 2025. 96 p.

[4] Gartner. Модель цифровой зрелости для государственного сектора. Gartner Research, 2023, ID: G00775823.

9. De Marchi V., Di Maria E., Micelli S. Industry 4.0 and circular economy: An exploratory analysis of academic and practitioners' perspectives // *Business Strategy and the Environment*, 2021, vol. 30(2), pp. 1221–1231.

10. Giurco D., Littleboy A., Boyle T. et al. Circular economy and digital technologies: A review of synergies // *Journal of Industrial Ecology*, 2023, vol. 27(4), pp. 890–906.

11. Lichtblau K., Stich V., Bertenrath R. et al. *IMPULS – Industrie 4.0-Readiness*. Aachen, FIR, 2015. 78 p.

12. Russell S., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 4th ed. London, Pearson, 2020. 1136 p.

A COMPREHENSIVE MODEL FOR ASSESSING THE DIGITAL MATURITY OF AN INDUSTRIAL ECOSYSTEM IN A CIRCULAR ECONOMY

Melnik Alexey Vadimovich, Graduate student, Analyst
Babkin Alexander Vasilyevich, Cand. Sci. (Eng.), Dr. Sci. (Econ.), Full Prof.
Filatchev Alexey Dmitrievich, M.A.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politechnicheskaya str., 29, letter B, St. Petersburg, Russia, 195251; e-mail: alexey55557@mail.ru

Importance: the shift of industrial ecosystems toward a circular economy calls for assessment tools that capture the network effects of closed-loop resource cycles. Existing digital maturity models focus on individual enterprises and largely miss the synergy generated through symbiotic linkages. *Purpose*: the study introduces a comprehensive model for assessing the digital maturity of a high-tech industrial ecosystem operating within a circular economy. *Research Design*: the model combines systems analysis, the index method, and qualimetry. Nine subpotentials are grouped into two circuits: Digital Potential (resource base) and Digital Foresight (strategic capabilities). Industrial symbiosis is embedded as a cross-cutting core that runs through all four evaluation blocks. The biotechnological subpotential is separated into resource and innovation components. Data collection relied on expert assessments (n = 22, Kendall's W = 0.68) and quantitative enterprise metrics. The weighted arithmetic mean was used for aggregation, while the geometric mean served as a robustness check. *Results*: the model was tested on the St. Petersburg Clean Technology Cluster and the Telman eco-industrial park (cooperation coefficient 0.47). The calculations produced an integral Digital Maturity Index of 0.72 (High level), a Digital Potential Index of 0.735, and a Digital Foresight Index of 0.686. Subpotential profiling exposed a bottleneck in the ecosystem component (0.47), compared with a strong organizational-managerial score of 0.89. The gap between the arithmetic and geometric estimates remained below 0.1%. A roadmap was developed with a target ICI of 0.85 or higher. The model's originality lies in treating symbiosis as a cross-cutting core and in splitting the biotechnological subpotential into two distinct aspects.

Keywords: digital maturity, industrial ecosystem, industrial symbiosis, assessment model, subpotential, digital potential, digital foresight, circular economy.

References

1. Babkin A.V., Mel'nik A.V., Din Khaitsi. Podkhody i metody otsenki tsifrovoi zrelosti intellektual'nykh promyshlennykh sistem v ekonomike dannykh [Approaches and methods for assessing the digital maturity of intelligent industrial systems in the data economy]. *Vestnik Akademii znanii*, 2025, no. 4 (69), pp. 47–57. (In Russ.)

2. Ivanov D.Yu., Petrova L.I. Tsifrovaia ustoichivost' promyshlennykh sistem v usloviiakh importozameshcheniia [Digital sustainability of industrial systems under import substitution]. *Informatsionnye tekhnologii v biznese*, 2022, no. 3 (45), pp. 12–25. (In Russ.)

3. Efimova O.V., Rozhnova O.V. Strategiya garmonizatsii finansovoy i nefinansovoy otchetnosti v oblasti raskrytiy klimaticheskikh riskov [Strategy for harmonizing financial and non-financial reporting in the field of climate risk disclosure]. *Uchet. Analiz. Audit*, 2020, vol. 7, no. 3, pp. 18–25. (In Russ.)

4. Kleiner G.B. Promyshlennye ekosistemy: vzgliad v budushchee [Industrial ecosystems: A look into the future]. *Ekonomicheskoe vozrozhdenie Rossii*, 2018, no. 2, pp. 53–62. (In Russ.)

5. Kudryavtseva O.V., Yakovleva E.Yu. Eko-industrial'nye parki kak draivery tsirkuliarnoi ekonomiki [Eco-industrial parks as drivers of the circular economy]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ekonomika*, 2023, vol. 39, iss. 2, pp. 312–330. (In Russ.)

6. Mel'nik A.V. Aktual'nye voprosy i sotsial'no-ekonomicheskie perspektivy v Rossii i mire v usloviiakh geoekonomicheskikh, tekhnologicheskikh i ekologicheskikh transformatsii [Current issues and socio-economic prospects in Russia and the world in the context of geoeconomic, technological and environmental transformations]. *Nauchnyi al'manakh Tsentral'nogo Chernozem'ia*, 2022, no. 1-9, pp. 214–220. (In Russ.)

7. Mel'nik A.V., Babkin A.V., Mikhailov P.A., Trapeznikova A.M. Biotekhnologicheskii subpotentsial tsifrovogo promyshlennogo predpriiatiia i ekosistemy v kontekste ESG [Biotechnological subpotential of a digital industrial enterprise and ecosystem in the ESG context]. *Estestvenno-gumanitarnye issledovaniia*, 2025, no. 3 (59), pp. 341–349. (In Russ.)

8. Tolstykh T.O., Shmeleva N.V., Agaeva A.M. Modeli otsenki zrelosti promyshlennykh ekosistem [Maturity assessment models for industrial ecosystems]. *Modeli, sistemy, seti v ekonomike, tekhnike, prirode i obshchestve*, 2021, no. 1, pp. 5–20. (In Russ.)

9. De Marchi V., Di Maria E., Micelli S. Industry 4.0 and circular economy: An exploratory analysis of academic and practitioners' perspectives. *Business Strategy and the Environment*, 2021, vol. 30(2), pp. 1221–1231. (In Eng.)

10. Giurco D., Littleboy A., Boyle T. et al. Circular economy and digital technologies: A review of synergies. *Journal of Industrial Ecology*, 2023, vol. 27(4), pp. 890–906. (In Eng.)

11. Lichtblau K., Stich V., Bertenrath R. et al. *IMPULS – Industrie 4.0-Readiness.* Aachen, FIR, 2015. 78 p. (In Eng.)

12. Russell S., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 4th ed. London, Pearson, 2020. 1136 p. (In Eng.)