

Научная статья
УДК 330.45
DOI 10.18101/2304-4446-2026-3-24-28

**Орбитально-резонансная синергия и энтропийная амортизация
в региональных циркулярных системах:
развитие модели ресурсных орбит**

© Барлуков Александр Михайлович
кандидат экономических наук, доцент
barlukov88@mail.ru

© Барлуков Роман Александрович
обучающийся
barlukovroman@mail.ru

Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова
Россия, 670000, г. Улан-Удэ, ул. Ранжурова, 4

Аннотация. В настоящей статье развивается ранее предложенная авторами модель ресурсных орбит региональной экономики, направленная на анализ циркулярного воспроизводства. В отличие от базовой версии, оперирующей преимущественно количественными показателями возврата, данное исследование вводит два новых концептуальных элемента: постепенное снижение технологической пригодности материалов после каждого цикла переработки, названное энтропийной амортизацией, и нелинейный синергетический эффект, возникающий при временном совпадении ритмов различных материальных потоков, определяемый как орбитальный резонанс. Для их количественной оценки предложены оригинальные математические конструкции. Разработанный аналитический аппарат позволяет идентифицировать скрытые «резонансные узлы» производственных сетей, обосновывать целевые институциональные интервенции и формировать сценарии синхронизации циклов возврата с учетом реальной технологической выработки материалов. Теоретическая значимость работы заключается в расширении методологического инструментария моделирования циркулярных процессов, а практическая ценность — в создании основы для проектирования устойчивых циркулярных платформ на уровне субъектов Российской Федерации.

Ключевые слова: экономика замкнутого цикла, ресурсная орбита, энтропийная амортизация, орбитальный резонанс, региональная экономика, математическое моделирование, нелинейная динамика.

Для цитирования

Барлуков А. М., Барлуков Р. А. Орбитально-резонансная синергия и энтропийная амортизация в региональных циркулярных системах: развитие модели ресурсных орбит // Вестник Бурятского государственного университета. Экономика и менеджмент. 2026. № 3. С. 24–28.

В предыдущей публикации нами была представлена базовая модель ресурсных орбит, описывающая движение материалов в региональной экономике как систему повторяющихся циклов [1]. Основное рекурсивное уравнение орбитальной динамики имело следующий вид:

$$R_i(t+1) = \alpha_i \cdot R_i(t) + \gamma_i \cdot f_i(R_i(t)) + \delta_i - \beta_i \cdot R_i(t) - \theta_i \cdot g_i(R_i(t)),$$

где

$\alpha_i \cdot R_i(t)$ — удерживаемая часть орбиты;

$\gamma_i \cdot f_i(R_i(t))$ — эффект переработки (орбитальное ускорение);

δ_i — внешний приток;

$\beta_i \cdot R_i(t)$ — орбитальное трение;

$\theta_i \cdot g_i(R_i(t))$ — перегрузка инфраструктуры.

Указанный подход позволил перейти от статических материальных балансов к траекторному анализу и ввести показатели орбитального трения, удерживаемости и перегрузки инфраструктуры. Вместе с тем первоначальная версия оперировала усредненными параметрами и не учитывала два принципиальных аспекта реальной циркулярной динамики, отмеченных в более ранних наших исследованиях [2]: во-первых, качественное снижение свойств вторичного сырья после каждого возврата; во-вторых, скрытый синергетический эффект, возникающий, когда ритмы оборота разных материалов начинают совпадать.

Большинство существующих работ по циркулярной экономике рассматривает возврат ресурсов в бинарной логике: материал либо возвращается в производство, либо выбрасывается [3]. На практике же ситуация выглядит иначе. Каждый цикл переработки оставляет «след»: примеси накапливаются, структура волокон или сплавов меняется, совместимость с технологическими линиями снижается. Мы предлагаем назвать это явление энтропийной амортизацией и ввести для его количественной оценки коэффициент $\varepsilon_i^{(k)}$, показывающий долю технологической пригодности ресурса i после k -го цикла. В отличие от стандартных линейных коэффициентов износа предлагаемая формула учитывает не только объем переработки, но и режим нагрузки перерабатывающего узла, а также отклонение от оптимального времени цикла:

$$\varepsilon_i^{(k)} = \varepsilon_i^{(k-1)} \cdot \left[1 - \alpha_i \cdot \left(\frac{Q_i^{(k)}}{C_i^{\text{проект}}} \right)^{\theta_i} \cdot (1 + \gamma_i \cdot |T_k - T_{\text{онм}}|) \right],$$

где

α_i — отраслевой параметр скорости качественной деградации;

$Q_i^{(k)}$ — объем ресурса, прошедшего обработку в цикле k ;

$C_i^{\text{проект}}$ — проектная мощность перерабатывающего контура;

θ_i — показатель нелинейности износа ($\theta_i \in [1, 2]$);

T_k — фактическая продолжительность цикла;

$T_{\text{онм}}$ — технологически оптимальная длительность;

γ_i — коэффициент чувствительности к временным отклонениям.

Необходимо отметить, что при $\varepsilon_i^{(k)} < \varepsilon_i^{\min}$ ресурс признается технологически выработанным и выводится из орбиты, где $\varepsilon_i^{\min}$ обозначает предельный порог, при достижении которого материал окончательно выводится из циркулярного обращения. В расчетной схеме данный параметр выступает экзогенной величиной, определяемой внешними технико-экономическими условиями: отраслевыми нормативами качества, технологическими допусками оборудования при работе со вторсырьем, а также экономической целесообразностью дополнительной очистки или глубокого фракционирования.

Вторым расширением выступает концепция орбитально-резонансной синергии. В реальной региональной сети разные материальные потоки (например, древесная щепа $\rightarrow$ топливные пеллеты $\rightarrow$ тепло $\rightarrow$ сушка древесины) часто функционируют параллельно, но рассинхронизированно. Когда их циклы начинают совпадать по времени и технологическим окнам, возникает эффект, который мы предлагаем формализовать через коэффициент фазового совпадения $\sigma_{ij} \in [0,1]$:

$$\sigma_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N e^{\frac{|\tau_i(t) - \tau_j(t) + \delta_{ij}|}{\rho_{ij}}} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot \Delta L_{ij}}{L_{\max}}\right),$$

где

$\tau_i(t), \tau_j(t)$ — фактические интервалы между возвратами ресурсов i и j в период t ;

δ_{ij} — институциональный сдвиг (нормативные лаги, логистические задержки);

ρ_{ij} — параметр допустимого рассогласования;

ΔL_{ij} — разница в технологической длине орбит;

$L_{\max}$ — максимальный радиус орбиты в региональной системе.

При $\delta_{ij} \geq 0,75$ возникает резонансная блокировка: потоки начинают взаимно стабилизировать друг друга, снижая вероятность схождения с орбиты даже при локальных инфраструктурных разрывах. Экономический смысл, по нашему мнению, заключается в том, что синхронизация ритмов дает больший эффект, чем простое наращивание перерабатывающих мощностей.

С учетом введенных параметров рекурсивное уравнение орбитальной динамики принимает следующий вид:

$$R_i(t+1) = \alpha_i \cdot R_i(t) + \gamma_i \cdot f_i(R_i(t)) \cdot \varepsilon_i^{(k)} \cdot \left(1 + \sum_{j \neq i} \sigma_{ij} \cdot k_{ij}\right) + \delta_i - \beta_i \cdot R_i(t) - \theta_i \cdot g_i(R_i(t)),$$

где член переработки $\gamma_i \cdot f_i(R_i(t))$ теперь модифицирован двумя новыми факторами:

$\varepsilon_i^{(k)}$ — коэффициентом энтропийной амортизации, отражающим снижение технологической пригодности после k циклов;

$\left(1 + \sum_{j \neq i} \sigma_{ij} \cdot k_{ij}\right)$ — множителем орбитального резонанса, показывающим синергетический эффект от синхронизации с другими ресурсными потоками, где k_{ij} — вес технологической совместимости орбит i и j .

Таким образом, базовая структура уравнения из предыдущей работы сохранена, но член переработки расширен с учетом качественной деградации материалов и межорбитальных взаимодействий.

Практическая ценность предложенных конструкций заключается в возможности находить «резонансные узлы» региональной экономики. Это точки, где совпадение ритмов двух-трех потоков дает непропорционально высокий эффект удержания ресурсов. В отличие от традиционных кластерных подходов, ориентированных на географическую близость предприятий [3], орбитально-резонансный анализ смещает фокус на временную и технологическую совместимость циклов. Это позволяет обосновывать создание не просто перерабатывающих площадок, а синхронизированных циркулярных платформ, где нормативные, логистические и производственные ритмы выстраиваются в единую траекторию.

Методологические ограничения разработанных моделей носят преимущественно эмпирический характер. Параметризация коэффициентов энтропийной амортизации α_i , θ_i требует детализированных данных о качестве вторичного сырья на входе и выходе перерабатывающих контуров, которые в российской статистике фиксируются фрагментарно. Расчет фазового совпадения σ_{ij} предполагает наличие панельных данных с разрешением не ниже квартального, что пока недоступно для большинства муниципальных образований. Кроме того, текущая версия не инкорпорирует экзогенные макроэкономические шоки, способные мгновенно нарушить резонансную синхронизацию. Дальнейшие исследования предполагается направить на разработку методов обратной параметризации на основе телеметрии IoT-датчиков, внедрение стохастических компонентов для описания шоковых переходов между орбитальными состояниями и создание цифровых двойников региональных циркулярных экосистем.

Развитие модели ресурсных орбит путем введения энтропийной амортизации и орбитально-резонансной синергии позволяет преодолеть линейную парадигму циркулярного моделирования и перейти к нелинейной, фазовозависимой аналитике. Предложенные математические конструкции учитывают градиентное снижение технологического потенциала материалов и нелинейный эффект синхронизации ритмов разных материальных потоков. Игнорирование этих факторов приводит к систематическому завышению циркулярного потенциала и неэффективному распределению инвестиционных ресурсов. В условиях структурной перестройки российских регионов инструментарий орбитально-резонансного анализа может стать основой для проектирования самоподдерживающихся циркулярных кластеров. Последующие этапы исследований также будут сосредоточены на разработке алгоритмов управления орбитальной фазой в условиях институциональной неопределенности.

Литература

1. Барлуков А. М., Барлуков Р. А. Ресурсные орбиты региональной экономики: экономико-математическая модель формирования замкнутых циклов воспроизводства // Вестник Бурятского государственного университета. Экономика и менеджмент. 2026. № 1. С. 36–41.
2. Барлуков А. М. Об одном из подходов к экономико-математическому моделированию экономики замкнутого цикла региона // Вестник Бурятского государственного университета. Экономика и менеджмент. 2024. № 4. С. 24–27.
3. Бахтизин А. Р. Моделирование сложных систем в региональной экономике: монография. Москва: Экон-Информ, 2018. 303 с.

Статья поступила в редакцию 31.05.2026; одобрена после рецензирования 24.08.2026; принята к публикации 24.08.2026.

Orbital-Resonance Synergy and Entropic Amortization in Regional Circular Systems: Developing the Resource Orbit Model

Aleksandr M. Barlukov
Cand. Sci. (Econ.), A/Prof.
barlukov88@mail.ru

Roman A. Barlukov
Student
barlukovroman@mail.ru

Dorzhi Banzarov Buryat State University
4 Ranzhurova St., Ulan-Ude 670000, Russia

Abstract. The article advances the previously proposed resource orbit model of the regional economy designed to analyze circular reproduction processes. Unlike the baseline version, which primarily operates with quantitative return metrics, this study introduces two new conceptual elements: gradual decline in the technological viability of materials after each processing cycle termed entropic amortization, and the non-linear synergetic effect that occurs when the rhythms of different material flows temporarily coincide defined as orbital resonance. Original mathematical constructs are proposed to quantify these phenomena. The developed analytical framework enables the identification of hidden "resonance nodes" within production networks, justifies targeted institutional interventions, and supports the design of return-cycle synchronization scenarios that account for the actual technological wear of materials. The theoretical significance of the work lies in expanding the methodological toolkit for modeling circular processes, while its practical value consists in creating a foundation for designing sustainable circular platforms at the level of Russian regions.

Keywords: circular economy, resource orbit, entropic amortization, orbital resonance, regional economy, mathematical modeling, nonlinear dynamics.

For citation

Barlukov A. M., Barlukov R. A. Orbital-resonance synergy and entropic amortization in regional circular systems: Developing the resource orbit model. *Bulletin of Buryat State University. Economy and Management*. 2026; 3: 24–28 (In Russ.).

The article was submitted 31.05.2026; approved after reviewing 24.08.2026; accepted for publication 24.08.2026.