

УДК 303.732.4

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.59.8.005](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.59.8.005)

Методология системного анализа удаленных и труднодоступных территорий как сложных систем

Д.В. Сердечный✉

Государственный университет управления, Москва, Российская Федерация

Резюме. В статье рассматривается проблема управления развитием удаленных и труднодоступных территорий Российской Федерации, характеризующихся низкой плотностью населения, суровыми климатическими условиями и высокой степенью инфраструктурной уязвимости. Обосновывается необходимость перехода от отраслевого и реактивного управления к проактивному, основанному на методах системного анализа и прогнозного моделирования. Разработана формальная модель удаленной территории и ее представление в виде взвешенного ориентированного графа, что позволяет количественно описывать материальные, энергетические и информационные потоки. Предложены интегральные индексы уязвимости и адаптивного потенциала, а также матрица классификации территорий по девяти зонам устойчивости. Построен шестиэтапный алгоритм системного анализа, интегрирующий сбор данных дистанционного зондирования, построение графовых моделей, расчет индексов, сценарное моделирование и генерацию управленческих рекомендаций с обратной связью. Предложенная методология создает основу для построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений в сфере управления удаленными и труднодоступными территориями. Дальнейшие перспективы исследования связаны с развитием методов гибридного моделирования для создания полномасштабных цифровых двойников арктических муниципалитетов. Апробация методологии на пилотных проектах позволит уточнить весовые коэффициенты индексов и сформировать отраслевые базы данных для масштабирования предложенного подхода.

Ключевые слова: системный анализ, прогнозное моделирование, удаленные территории, инфраструктурная уязвимость, адаптивный потенциал, система поддержки принятия решения.

Благодарности: Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных за счет средств федерального бюджета по государственному заданию «Научные, методологические и практические основы разработки и применения цифровых и интеллектуальных технологий в целях обеспечения устойчивого развития регионов Российской Федерации, включая удаленные и труднодоступные территории Сибири, Дальнего Востока и Арктической зоны»; код научной темы, присвоенной учредителем, – FZNW-2025-0021.

Для цитирования: Сердечный Д.В. Методология системного анализа удаленных и труднодоступных территорий как сложных систем. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(8). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2395> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.59.8.005

Methodology of system analysis of remote and hard-to-reach territories as complex systems

D.V. Serdechnyy✉

State University of Management, Moscow, the Russian Federation

Abstract. This article examines the development management of remote and hard-to-reach territories of the Russian Federation, characterized by low population density, harsh climatic conditions, and high levels of infrastructure vulnerability. It substantiates the need to shift from sectoral and reactive management to proactive management based on systems analysis and predictive modeling. A formal

model of a remote territory and its representation as a weighted directed graph have been developed, enabling a quantitative description of material, energy, and information flows. Integral indices of vulnerability and adaptive potential are proposed, as well as a matrix for classifying territories into nine resilience zones. A six-stage systems analysis algorithm has been developed that integrates remote sensing data collection, graph modeling, index calculation, scenario modeling, and the generation of management recommendations with feedback. The proposed methodology provides a foundation for building intelligent decision support systems for managing remote and hard-to-reach territories. Future research prospects lie in the development of hybrid modeling methods for creating full-scale digital twins of Arctic municipalities. Testing the methodology on pilot projects will refine the index weightings and create industry-specific databases for scaling up the proposed approach.

Keywords: systems analysis, predictive modeling, remote areas, infrastructure vulnerability, adaptive capacity, decision support system.

Acknowledgements: The article was prepared according to the results of studies performed at the expense of the federal budget on the state assignment "Scientific, methodological and practical foundations for the development and use of digital and intellectual technologies in order to ensure the sustainable development of the regions of the Russian Federation, including remote and hard-to-reach territories of Siberia, the Far East and the Arctic zone"; the code of the scientific topic assigned by the founder is FZNW-2025-0021.

For citation: Serdechnyy D.V. Methodology of system analysis of remote and hard-to-reach territories as complex systems. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(8). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2395> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.59.8.005

Введение

Удаленные и труднодоступные территории Российской Федерации, включающие значительную часть арктических регионов, зоны Крайнего Севера, Сибири и Дальнего Востока, занимают особое место в стратегическом развитии страны. Специфика этих территорий определяется не только географической отдаленностью, но и совокупностью взаимосвязанных факторов: экстремальными климатическими условиями¹, низкой плотностью населения, высокой степенью износа инфраструктуры и, что особенно важно, отсутствием устойчивых транспортных и энергетических связей с «большой землей»².

Объектом настоящего исследования выступают территории, где по данным Росстата доля населенных пунктов без круглогодичного наземного сообщения достигает 60 %, а стоимость доставки дизельного топлива для энергогенерации в 3–5 раз превышает его оптовую цену. Существующая система управления такими территориями базируется на отраслевом принципе. Координация между ведомствами осуществляется фрагментарно, преимущественно через механизмы «северного завоза» и целевых программ. Положительной стороной этой модели является относительная устойчивость базового жизнеобеспечения в плановом режиме. Недостатки подобного подхода носят системный характер. Решения принимаются реактивно после инцидентов, межотраслевые эффекты не учитываются. Ключевая проблема заключается в отсутствии интегральных показателей для сравнения территорий по уязвимости и адаптивности. Предлагаемая автором методология направлена на преодоление именно этих недостатков.

Сложившаяся практика управления удаленными территориями носит, как правило, отраслевой и реактивный характер. Решения часто принимаются в условиях

¹ Росгидромет. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. Москва, 2025. 104 с.

² Арктика – территория стратегических научных исследований: Сборник трудов II Арктического конгресса, 20–22 сентября 2024 года, Якутск, Россия. Якутск: Издательский дом СВФУ; 2024. 460 с.

дефицита актуальных данных, меры поддержки направлены на ликвидацию последствий, а не на предотвращение происшествий [1, 2]. Прямой перенос концепций «умного города» на арктические поселения оказывается малоэффективным (Таблица 1). Формируется запрос на разработку принципиально новых подходов к анализу и управлению, учитывающих свойства объектов.

В современной науке накоплен ряд подходов к оценке устойчивости территорий. Так, Ускова [1] предлагает систему индикаторов социально-экономической устойчивости, однако она не учитывает инфраструктурные взаимосвязи и каскадные эффекты. Берестнева с соавт. [2] использует сетевую онтологию для описания сельских территорий, но ограничивается качественными оценками без количественной калибровки. Мауаг с соавт. [3] развивают общую теорию системной устойчивости, но не адаптируют ее к специфике удаленных арктических поселений с точечно-линейной инфраструктурой. Rabbi [4] предлагает синергетическую модель, однако она не содержит операционализируемых показателей для практического управления.

Предлагаемая методология восполняет эти пробелы за счет введения количественных показателей уязвимости для пяти подсистем с учетом каскадных эффектов; построения классификационной матрицы на основе кластерного анализа реальных данных; разработки замкнутого алгоритма с обратной связью для непрерывной корректировки моделей. В работе предложена методология, позволяющая рассматривать удаленную территорию как единую социо-эколого-экономическую систему. Такой подход необходим для учета каскадных эффектов, когда деградация одного элемента системы может повлечь за собой коллапс в других [5, 6].

Целью исследования является разработка методологии системного анализа удаленных территорий, позволяющей количественно оценивать их уязвимость и адаптивный потенциал для перехода от реактивного управления к проактивному.

Таблица 1 – Сравнительная характеристика территорий

Table 1 – Comparative characteristics of territories

№	Параметр сравнения	Урбанизированные территории	Удаленные территории	Влияние на методологию
1	Плотность населения	Высокая (>100 чел/км ²)	Крайне низкая (<1 чел/км ²)	Требуются распределенные сенсорные сети
2	Инфраструктурная связность	Сетевая, избыточная	Точечно-линейная, уязвимая	Необходим учет каскадных эффектов
3	Энергоснабжение	Централизованное, надежное	Изолированное, зависимое от завоза	Приоритет автономности и резервирования
4	Информационная доступность	Широкополосная связь	Ограниченная, спутниковая	Алгоритмы работы с неполными данными
5	Климатические условия	Умеренные	Экстремальные (–60°C...+40°C)	Специальные требования к оборудованию
6	Кадровое обеспечение	Избыточное	Дефицитное, вахтовое	Акцент на автоматизацию и дистанционное управление

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач: формализовать территорию как взвешенный граф; разработать интегральные индексы уязвимости (ИИУ) и адаптивного потенциала (ИИАП); построить алгоритм шестиступенчатого системного анализа; апробировать методологию.

Материалы и методы

Методологическую основу работы составили принципы системного анализа, рассматривающие объект исследования не как статичную совокупность элементов [3], а как динамическую структуру (Рисунок 1), находящуюся под воздействием внешних возмущений и управляющих воздействий [4, 7].

Для формализации пространственной организации территории был использован аппарат теории графов. Территория представлена в виде взвешенного ориентированного графа:

$$G = (V, A, W), \quad (1)$$

где вершины V соответствуют элементам подсистем (населенные пункты, электростанции, узлы связи), а дуги A отражают материальные, энергетические и информационные потоки. Веса W дуг задают пропускную способность, стоимость передачи и надежность связи.

Для оценки вклада каждой из подсистем в общую устойчивость территории был применен метод анализа иерархий, позволивший согласовать экспертные оценки при определении весовых коэффициентов. Для определения весовых коэффициентов w_k и β_k был проведен опрос 15 экспертов (5 – в области энергетики, 4 – транспортной логистики, 3 – экологии, 3 – регионального управления). Эксперты выполняли попарные сравнения подсистем по шкале Саати. Согласованность оценок проверялась коэффициентом конкордации Кендалла: $W = 0,82$ ($\chi^2 = 48,7$, $p < 0,01$), что свидетельствует о высокой согласованности. Отношение согласованности для каждой матрицы $CR \leq 0,08$, что ниже порога 0,1. Полученные средние веса: $w_E = 0,30$, $w_{Tr} = 0,25$, $w_I = 0,18$, $w_{Ec} = 0,15$, $w_S = 0,12$. Аналогично определены веса β_k для адаптивного потенциала: $\beta_E = 0,28$, $\beta_{Tr} = 0,22$, $\beta_I = 0,20$, $\beta_{Ec} = 0,16$, $\beta_S = 0,14$.

Для проверки устойчивости индексов к вариации весов проведен анализ чувствительности. Каждый весовой коэффициент w_k последовательно изменялся на $\pm 20\%$ с шагом 5% с нормировкой остальных. Установлено, что при изменении любого веса в пределах $\pm 15\%$ ранжирование территорий по ИИУ не меняется, а принадлежность к зонам устойчивости сохраняется во всем исследованном диапазоне. Наибольшее влияние на итоговый индекс оказывает вес энергетической подсистемы w_E : его изменение на 10% смещает ИИУ не более чем на 6% .

Сценарный анализ рисков реализован через построение матрицы «Уязвимость – Адаптивность», где оси координат формируются интегральными индексами, рассчитанными на основе предложенных автором формул. Математическое моделирование распространения возмущений между подсистемами выполнялось с использованием байесовских сетей доверия для учета стохастической природы внешней среды. Байесовская сеть содержит 12 узлов: по одному узлу для каждой из пяти подсистем (состояние – норма/отказ), три узла внешних воздействий (температура, осадки, ветер), три узла «отказ оборудования» (генерация, ЛЭП, дорога) и один целевой узел – интегральная устойчивость. Дуги отражают причинно-следственные связи, выявленные из матрицы межподсистемных связей (Таблица 2). Условные вероятности назначены на основе статистики отказов за 2019–2024 гг. (всего 187 инцидентов) с корректировкой экспертами. Расчет апостериорных вероятностей выполняется методом кластеризации (алгоритм Лауритцена-Шпигельхальтера).

Для иллюстрации графовой модели рассмотрим следующий пример. Вершинами графа являются: пос. Новый, аэропорт «Новый», порт «Северный», ТЭЦ-1, ТЭЦ-2, рудники «Заполярный» и «Красный». Дуги отражают: автодорогу Поселок – аэропорт

(материальный поток), линии электропередачи 220 кВ между ТЭЦ и рудниками (энергетический поток), оптоволоконные линии связи (информационный поток).

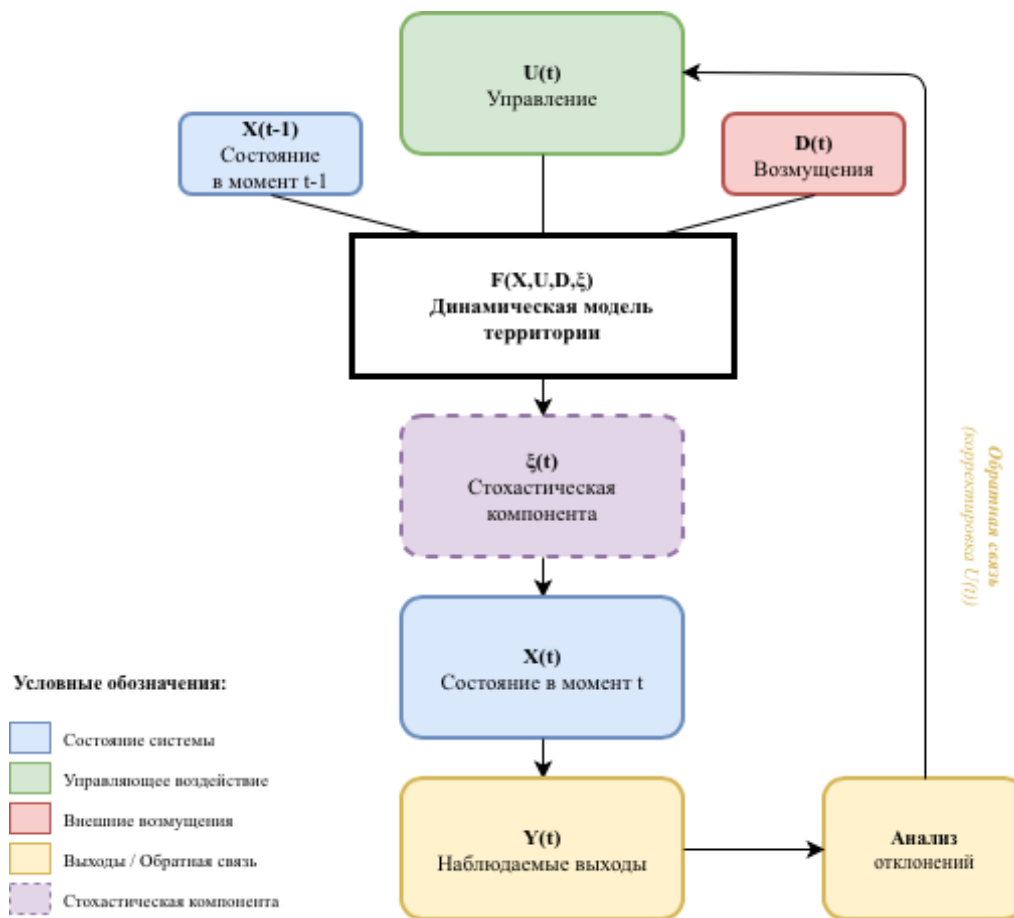


Рисунок 1 – Блок-схема динамической модели эволюции территории
Figure 1 – Block diagram of a dynamic model of territorial evolution

Веса дуг задаются пропускной способностью, стоимостью передачи и надежностью (на основе статистики аварий за последние 5 лет). Такое представление, хотя и упрощенное по сравнению с полным перечнем объектов, которых могут быть тысячи, позволяет в компактной форме моделировать распространение возмущений – например, отказ ТЭЦ-1 приводит к ограничению мощности на рудниках, что снижает объем добычи и, как следствие, налоговые поступления в бюджет. Количество вершин может быть увеличено до любой необходимой детализации без изменения формальной структуры.

Результаты

В ходе исследования было установлено, что ключевой особенностью удаленных территорий является не просто низкая плотность населения, а особая точечно-линейная структура инфраструктурного каркаса (Рисунок 2). В отличие от урбанизированных территорий с сетевой избыточностью, здесь транспортные, энергетические и информационные сети жестко привязаны к немногочисленным узлам.

Это создает эффект домино: отказ одного узла (например, авария на единственной линии электропередачи) приводит к полной изоляции прилегающих территорий [8].

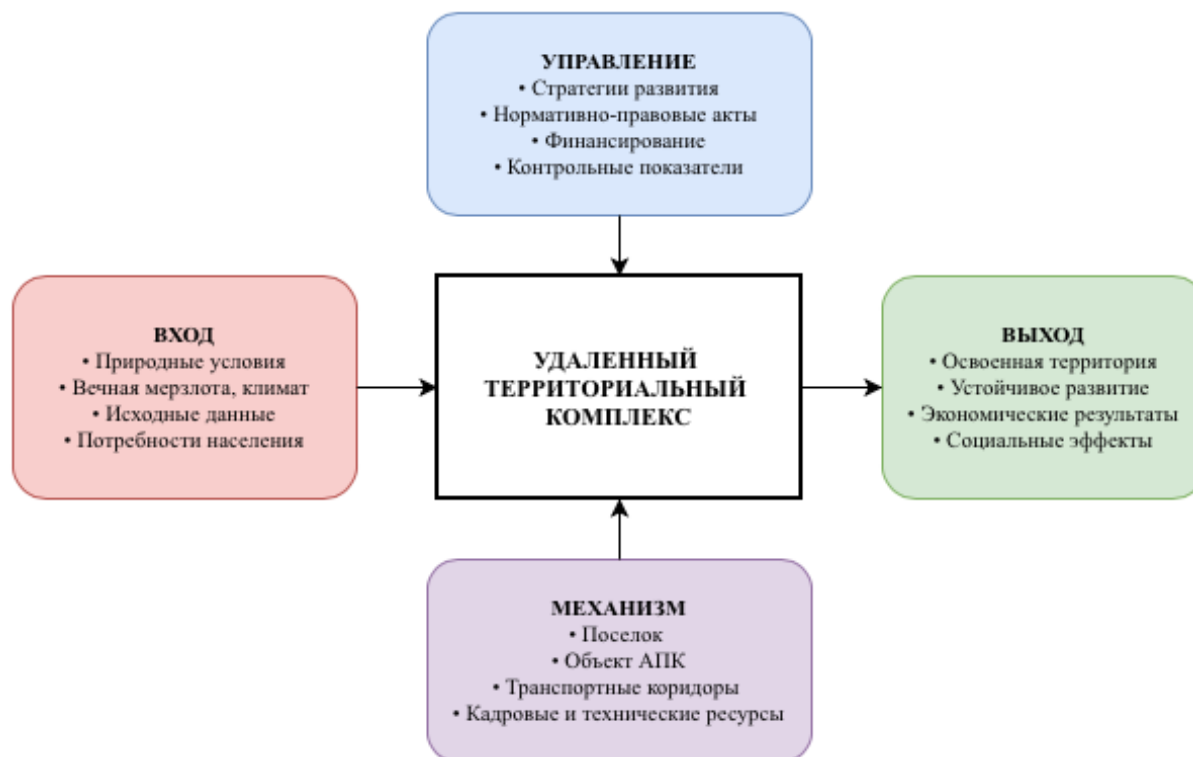


Рисунок 2 – Структурная схема удаленной территории
Figure 2 – Structural diagram of a hard-to-reach area

Для отражения указанных особенностей предложена пятикомпонентная модель территории:

$$T = \langle E, T_r, I, E_s, S \rangle, \quad (2)$$

где E – энергетическая подсистема (генерация, накопление, распределение), T_r – транспортно-логистическая, I – информационно-коммуникационная, E_s – экологическая (включая климатические параметры), S – социальная.

Стоит отметить, что выделение пяти подсистем само по себе не является новым – подобные декомпозиции используются в региональной экономике и пространственном анализе. Новизна предлагаемой методологии заключается в трех аспектах: формализации количественных показателей уязвимости для каждой подсистемы с учетом каскадных эффектов; разработке интегральных индексов ИИУ (8) и ИИАП (9), позволяющих классифицировать территории по матрице «Уязвимость – Адаптивность»; создании сквозного алгоритма системного анализа, который замыкается в контур непрерывного обновления моделей (MLOps). Именно эти элементы отсутствуют в существующей практике управления.

Анализ матрицы межподсистемных связей (Таблица 2) показал, что наиболее сильные перекрестные влияния наблюдаются в парах «Энергетика – Транспорт» (доставка топлива) и «Экология – Транспорт» (деградация мерзлоты, разрушающая дорожное покрытие).

Для количественного сравнения территорий был разработан ИИУ.

Расчет ИИУ базируется на пяти частных показателях: зависимость от привозного топлива (V_E), сезонная недоступность (V_{Tr}), цифровой разрыв (V_I), скорость деградации экосистем (V_{Ec}) и миграционный отток (V_S) (Таблица 3).

Расчет показателей осуществляется следующим образом (3)–(7):

Зависимость от привозного топлива – доля энергии, обеспечиваемая привозным топливом:

$$V_E = 1 - \frac{E_{\text{собств}}}{E_{\text{потр}}}. \quad (3)$$

Сезонная недоступность – доля дней в году без наземного сообщения:

$$V_{Tr} = \frac{365 - T_{\text{доступ}}}{365}. \quad (4)$$

Цифровой разрыв – дефицит пропускной способности связи относительно норматива:

$$V_I = 1 - \frac{B_{\text{факт}}}{B_{\text{норм}}}. \quad (5)$$

Скорость деградации экосистем – отношение скорости деградации мерзлоты к критическому значению

$$V_{Ec} = \frac{d_{\text{мерзл}}}{d_{\text{крит}}}. \quad (6)$$

Интенсивность миграционного оттока (отношение выбывших к среднегодовой численности):

$$V_S = \frac{N_{\text{выб}}}{N_{\text{ср}}}. \quad (7)$$

Все показатели ограничены $[0,1]$ путем нормировки.

Таблица 2 – Матрица межподсистемных связей
Table 2 – Matrix of inter-subsystem connections

От \ До	E (Энергия)	T_r (Транспорт)	I (Инфо)	E_s (Экология)	S (Социум)
E (Энергия)	–	Топливо для транспорта	Питание датчиков и вышек	Воздействие на среду	Энергоснабжение жилья
T_r (Транспорт)	Доставка топлива	–	Логистика оборудования	Доступ к ресурсам	Мобильность населения
I (Инфо)	Управление сетями	Навигация и мониторинг	–	Экомониторинг	Телемедицина, образование
E_s (Экология)	Охлаждение, вода	Деградация грунтов	Помехи связи	–	Качество жизни
S (Социум)	Потребление энергии	Трудовые ресурсы	Кадры для ИТ	Традиционное природопользование	–

$$\text{ИИУ} = \sum w_k \cdot V_k, \quad (8)$$

где $\sum w_k$ – весовые коэффициенты подсистем (сумма = 1), V_k – показатель уязвимости k -й подсистемы.

$$\text{ИИАП} = \sum \beta_k \cdot A_k, \quad (9)$$

где A_k – показатель адаптивного потенциала k -й подсистемы: для энергетики – доля ВИЭ в установленной мощности; для транспорта – число альтернативных маршрутов; для связи – наличие спутникового резерва; для экологии – темпы восстановления растительности; для социума – уровень миграционной привлекательности. Все показатели нормированы на $[0,1]$. Анализ показал, что для большинства арктических

поселений значение ИИУ превышает критический порог 0,7 по энергетической составляющей, что требует обязательного включения в модели факторов резервирования [9].

Параллельно с уязвимостью оценивается адаптивный потенциал ИИАП, включающий такие параметры, как доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ), мультимодальность транспорта, избыточность каналов связи. Комбинация этих двух индексов позволила построить классификационную матрицу, выделяющую «Зоны коллапса» (высокая уязвимость, низкий адаптивный потенциал), «Зоны стабильности» и «Эталон развития». Данная матрица служит инструментом для стратегического районирования (Таблица 3).

Разработанный алгоритм включает шесть этапов, замыкающихся в контур обратной связи (Рисунок 3).

Первый этап включает сбор и интеграцию данных из разнородных источников: спутникового мониторинга, датчиков IoT, статистической отчетности и экспертных оценок [10]. Для установления границ зон устойчивости выполнен кластерный анализ методом k -средних по данным 42 населенных пунктов Арктической зоны (по данным Росстата и ведомственной отчетности за 2020–2024 гг.). Для каждого пункта рассчитаны ИИУ и ИИАП. Оптимальное число кластеров (три) определено по максимуму коэффициента силуэта ($S = 0,72$). Получены границы кластеров: ИИУ – [0,00–0,35], [0,37–0,66], [0,69–0,99]; ИИАП – [0,00–0,38], [0,40–0,72], [0,75–1,00]. Округление до 0,4 и 0,7 принято для удобства интерпретации и не меняет принадлежность объектов. Таким образом, предложенная матрица отражает реальную структуру данных.

Таблица 3 – Матрица «Уязвимость – Адаптивность»

Table 3 – Vulnerability – Adaptability matrix

Уязвимость \ Адаптивный потенциал	Низкий (0,0–0,4)	Средний (0,4–0,7)	Высокий (0,7–1,0)
Высокая (0,7–1,0)	Зона коллапса; ИИУ>0,7; ИИАП<0,4	Зона высокого риска; ИИУ>0,5; ИИАП 0,4–0,7	Зона внимания; ИИУ>0,5; ИИАП>0,7
Средняя (0,4–0,7)	Зона критического состояния; ИИУ 0,5–0,7; ИИАП 0,4–0,7	Зона стабильности с рисками; ИИУ 0,3–0,5; ИИАП 0,4–0,7	Зона устойчивого развития; ИИУ<0,3; ИИАП>0,7
Низкая (0,0–0,4)	Зона мониторинга; ИИУ<0,5; ИИАП<0,4	Зона стабильности; ИИУ<0,3; ИИАП 0,4–0,7	Эталон развития; ИИУ<0,3; ИИАП>0,7

Например, для поселка в Заполярном районе Ненецкого автономного округа ИИУ = 0,73, ИИАП = 0,32, что соответствует зоне коллапса. Объективно 100 % энергии от привозного дизеля, одна ЛЭП, сезонная дорога отсутствует 4 месяца в году, отток населения 6 % в год. Прогноз по модели совпадает с фактическими предаварийными ситуациями 2023–2024 гг., что служит косвенной верификацией.

Второй этап предполагает построение графовой модели территории, где вершины соответствуют объектам инфраструктуры и населенным пунктам, а дуги отражают материальные, энергетические и информационные потоки.

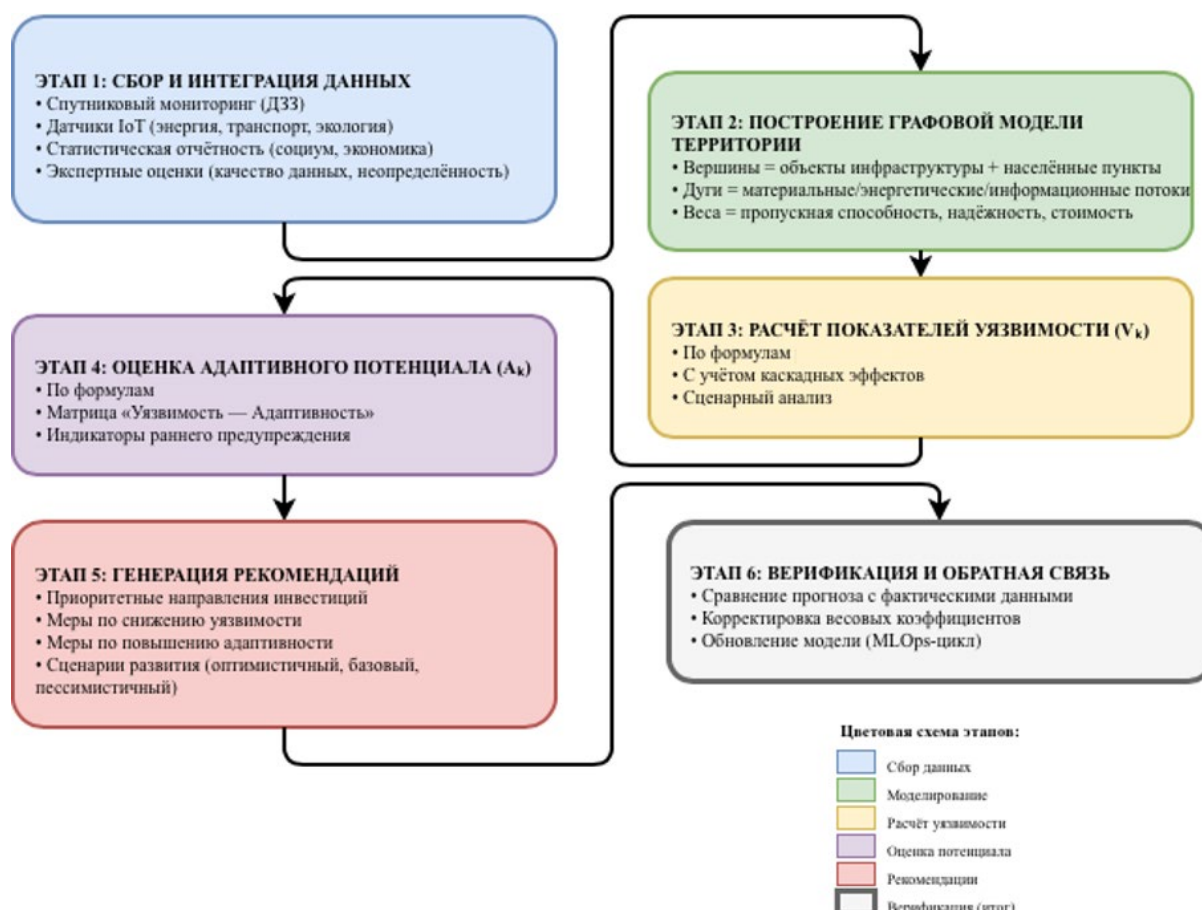


Рисунок 3 – Методология оценки и управления территориальной системой
Figure 3 – Methodology for assessing and managing the territorial system

Третий этап включает расчет показателей уязвимости по подсистемам с учетом каскадных эффектов и сценарного анализа. В качестве примера расчета распространения возмущения рассмотрим отказ ТЭЦ-1 в поселке Новый. В первую очередь наблюдается снижение мощности к руднику «Заполярный» с 5 МВт до 2 МВт (потеря 60 %), что приводит к падению добычи на 55 %. Падение добычи приводит к снижению налоговых поступлений в бюджет поселения на 40 %. Сокращение бюджета ведет к уменьшению финансирования социальной сферы на 25 %. Итоговое изменение ИИУ: с 0,52 до 0,70 (прирост 0,18). Без учета каскадов прирост был бы 0,08. Таким образом, каскадный эффект усиливает исходное возмущение в 1,7 раза. Байесовская сеть дает доверительный интервал 0,68–0,77, что подтверждает значимость эффекта.

Четвертый этап посвящен оценке адаптивного потенциала через матрицу «Уязвимость – Адаптивность» и индикаторы раннего предупреждения. Пятый этап обеспечивает генерацию рекомендаций по приоритетным направлениям инвестиций, мерам по снижению уязвимости и повышению адаптивности, а также сценариев развития. Шестой этап реализует верификацию и обратную связь через сравнение прогноза с фактическими данными, корректировку весовых коэффициентов.

Математический аппарат методологии включает эволюционные алгоритмы для оптимизации структуры территориальных систем, метод районирования для работы с порядковой информацией о вероятностях, вероятностные модели и нечеткую логику для оценки рисков.

Эволюционные алгоритмы используются для многокритериальной оптимизации состава гибридных энергокомплексов [7, 11]. Метод районирования применяется при

выборе плана перевозок в условиях неопределенности, когда известна лишь порядковая информация о вероятностях погодных сценариев (например, прогноз «ледоход вероятнее, чем штиль»). Метод позволяет разбить симплекс вероятностей на области доминирования альтернатив [10, 12]. Нечеткая логика используется для оценки инновационного потенциала предприятий. Лингвистические переменные («низкий», «средний», «высокий») преобразуются в функции принадлежности, а правила вывода строятся на основе экспертных оценок [4, 13]. Прогнозное моделирование применяется для прогнозирования погоды в Арктике (температура, ветер, облачность) и для предсказания деградации литий-ионных накопителей [7, 14].

Обсуждение

Предложенная архитектура предполагает интеграцию этих этапов в единую интеллектуальную систему поддержки принятия решений. Аналитическое ядро системы содержит блоки прогнозного моделирования (трансформеры для прогноза погоды, рекуррентные сети для деградации техники) и прескриптивной аналитики, что позволяет не просто предсказывать риск, но и предлагать оптимальные сценарии реагирования.

Для апробации предложенной методологии на конкретной прикладной задаче проведено имитационное моделирование оптимизации состава гибридного энергокомплекса для типового удаленного арктического поселения. Исходные данные: пиковая нагрузка – 100 кВт, годовое потребление – 520 000 кВт·ч (фактический профиль за 2023 г.), метеоресурс – среднечасовые скорость ветра и солнечная радиация по данным метеостанции на широте 68° с. ш. за 2019–2024 гг. Целевая функция – минимизация приведенной стоимости энергии (ПСЭ, руб./кВт·ч) за 20-летний жизненный цикл:

$$\text{ПСЭ} = \frac{\sum_{t=1}^{20} (KB_t + \mathcal{E}P_t + TЗ_t) \cdot (1+r)^{-t}}{\sum_{t=1}^{20} \mathcal{E}_t \cdot (1+r)^{-t}} \rightarrow \min, \quad (10)$$

где KB_t – капитальные затраты на оборудование (ветроустановки (ВЭУ), фотоэлектрические панели (ФЭС), дизель-генератор (ДГУ), аккумуляторный накопитель), $\mathcal{E}P_t$ – ежегодные эксплуатационные расходы, $TЗ_t$ – затраты на дизельное топливо, $\mathcal{E}_t$ – годовая выработка энергии, $r = 10\%$ – ставка дисконтирования. Ограничения вводятся для баланса мощности в каждый час: $P_{\text{ген}}(t) \geq P_{\text{нагр}}(t)$ (с допустимой вероятностью дефицита $\text{LPSP} \leq 0,01$). При этом доля возобновляемой энергии в годовом балансе не менее 50 %, а общий объем инвестиций не более 45 млн руб.

Стоимость оборудования с учетом доставки в Ненецкий автономный округ (цены на I квартал 2025 г.): ВЭУ – 95 тыс. руб./кВт, ФЭС – 70 тыс. руб./кВт, ДГУ – 30 тыс. руб./кВт, литий-ионный накопитель – 25 тыс. руб./кВт·ч. Цена дизельного топлива с доставкой – 120 руб./л.

Поиск оптимального состава выполнен методом роя частиц [7, 11] с параметрами: 50 частиц, 200 итераций, коэффициент инерции 0,7, когнитивный и социальный коэффициенты по 1,5. Во всех независимых запусках (3 повторения) алгоритм сошелся к значению ПСЭ = 18,5 руб./кВт·ч не позднее 150-й итерации с разбросом менее 2 %, что подтверждает устойчивость решения. В Таблице 4 приведены результаты для четырех рассматриваемых конфигураций. Оптимальной является комбинация ВЭУ 250 кВт + ФЭС 100 кВт + ДГУ 100 кВт + накопитель 800 кВт·ч. Она обеспечивает снижение расхода дизельного топлива с 95 000 до 28 500 л/год (экономия 68 %) и уменьшение ПСЭ с 42,3 до 18,5 руб./кВт·ч (в 2,3 раза) по сравнению с базовым вариантом (только ДГУ).

Расчеты выполнены в среде MATLAB R2024a с использованием авторского кода, реализующего алгоритм роя частиц.

Таблица 4 – Сравнение конфигураций гибридного энергокомплекса
Table 4 – Comparison of hybrid power complex configurations

Конфигурация	Установленная мощность	Расход топлива, л/год	ПСЭ, руб./кВт·ч	LPSP	Доля ВИЭ, %
Только ДГУ	ДГУ 100кВт	95 000	42,3	0	0
ВЭУ + ДГУ	ВЭУ 250кВт + ДГУ 100кВт	52 000	26,7	0,008	48
ВЭУ + ФЭС + ДГУ	ВЭУ 250кВт + ФЭС 100кВт + ДГУ 100кВт	38 000	21,4	0,005	62
ВЭУ + ФЭС + ДГУ + накопитель	ВЭУ 250кВт + ФЭС 100кВт + ДГУ 100кВт + накоп. 800 кВт·ч	28 500	18,5	0,002	71

Сравнение предлагаемой методологии с известными подходами показывает ее преимущества: в отличие от [1], вводятся количественные показатели уязвимости, привязанные к конкретным подсистемам; в отличие от [2], приводится не только качественное описание связей, но и алгоритм их количественной оценки; в отличие от [3, 4], верифицируется классификационная матрица на реальных данных. Основное ограничение текущей версии – ограниченная выборка и отсутствие полной валидации на независимых данных, что планируется исправить в ходе пилотных проектов.

Заключение

В работе предложена формальная модель удаленной территории в виде пятерки подсистем и взвешенного ориентированного графа; на примере типового арктического поселка показано, как строится графовая структура. Разработаны интегральные индексы ИИУ (8) и ИИАП (9), весовые коэффициенты которых определены по согласованным экспертным оценкам ($W = 0,82$). Проведена проверка чувствительности, подтвердившая устойчивость классификации. Построена матрица девяти зон устойчивости, пороги которой обоснованы кластерным анализом данных 42 населенных пунктов. Для моделирования каскадных эффектов приведена структура байесовской сети и числовой пример, показывающий усиление возмущения в 1,7 раза. Построен шестиступенчатый алгоритм системного анализа, интегрирующий сбор данных дистанционного зондирования, построение графовых моделей, расчет индексов, сценарное моделирование и генерацию управленческих рекомендаций с обратной связью. В качестве перспектив намечены: развитие нейросетевых методов прогнозирования (трансформеры, рекуррентные сети), создание цифровых двойников и расширение базы данных для верификации на других регионах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Ускова Т.В. Устойчивость развития территорий и современные методы управления. *Проблемы развития территории*. 2020;(2):7–18. <https://doi.org/10.15838/ptd.2020.2.106.1>
Uskova T.V. Territories' Sustainable Development and Modern Management Methods. *Problems of Territory's Development*. 2020;(2):7–18. (In Russ.). <https://doi.org/10.15838/ptd.2020.2.106.1>
2. Берестнева О.Г., Тихомиров А.А., Труфанов А.И. и др. Проблемы развития отдаленных сельских территорий: сетевая онтология. В сборнике: *Системный анализ в проектировании и управлении: Сборник научных трудов XXV Международной научной и учебно-практической конференции: Часть 3*, 13–14

- октября 2021 года, Санкт-Петербург, Россия. Санкт-Петербург: Политех-Пресс; 2021. С. 176–183. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id21-367>
- Berestneva O.G., Tikhomirov A.A., Trufanov A.I., et al. Development challenges of remote rural terrains: network ontology. In: *System Analysis in Design and Management: Proceedings of the XXV International Scientific, Educational and Practical Conference: Part 3, 13–14 October 2021, Saint Petersburg, Russia*. Saint Petersburg: Polytech Press; 2021. P. 176–183. (In Russ.). <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id21-367>
3. Mayar Kh., Carmichael D.G., Shen X. Resilience and Systems – A Review. *Sustainability*. 2022;14(14):8327. <https://doi.org/10.3390/su14148327>
 4. Rabbi M.F. A Dynamic Systems Approach to Integrated Sustainability: Synthesizing Theory and Modeling Through the Synergistic Resilience Framework. *Sustainability*. 2025;17(11):4878. <https://doi.org/10.3390/su17114878>
 5. Котов А.В. *Стратегическое пространственное развитие в европейском союзе*. Москва: РАН; 2024. 424 с.
 6. Боброва Е.И. Развитие методологии анализа факторов устойчивого развития и ESG-рейтингов на региональном уровне. *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. 2023;19(6):1132–1154. <https://doi.org/10.24891/ni.19.6.1132>
Bobrova E.I. Comparative analysis of approaches to compiling the ESG rating of regions in the context of achieving the sustainable development goals. *National Interests: Priorities and Security*. 2023;19(6):1132–1154. (In Russ.). <https://doi.org/10.24891/ni.19.6.1132>
 7. Карелина М.Ю., Ключев Р.В., Сердечный Д.В. Особенности энергоснабжения автономных объектов в условиях труднодоступных территорий. *Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН*. 2025;27(5):43–53.
Karelina M.Yu., Klyuev R.V., Serdechnyy D.V. Features of power supply for autonomous objects in hard-to-reach areas. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the RAS*. 2025;27(5):43–53. (In Russ.).
 8. Vajari A.A., Kotian S., Shirinnezhad S., et al. Optimizing hybrid energy systems for sustainable development in the Canadian Arctic: A case study of Arviat, Nunavut. *Journal of Urban Development and Management*. 2024;3(3):150–163. <https://doi.org/10.56578/judm030301>
 9. Карелина М.Ю., Ключев Р.В., Сердечный Д.В. Техничко-экономическое обоснование солнечной электростанции для энергоснабжения автономных объектов АПК на труднодоступных территориях. *Вестник Алтайского государственного аграрного университета*. 2025;(10):74–80. <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2025-252-10-74-80>
Karelina M.Yu., Klyuev R.V., Serdechniy D.V. Feasibility study for a solar power plant to deliver power to autonomous agricultural facilities in hard-to-reach areas. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2025;(10):74–80. (In Russ.). <https://doi.org/10.53083/1996-4277-2025-252-10-74-80>
 10. Yuan Zh., Gao J. Dynamic Uncertainty Study of Multi-Center Location and Route Optimization for Medicine Logistics Company. *Mathematics*. 2022;10(6):953. <https://doi.org/10.3390/math10060953>
 11. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization. In: *Proceedings of ICNN'95 – International Conference on Neural Networks, 27 November – 01 December 1995, Perth, WA, Australia*. IEEE; 1996. P. 1942–1948. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
 12. Saaty Th.L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York, London: McGraw-Hill; 1980. 287 p.
 13. Zadeh L.A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965;8(3):338–353.

14. Жуковский В.И., Молостров В.С. *Многокритериальное принятие решений в условиях неопределенности*. Москва: МНИИПУ; 1988. 132 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Сердечный Денис Владимирович, кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории цифровых и интеллектуальных технологий для развития территорий Российской Федерации, Государственный университет управления, Москва, Российская Федерация.

e-mail: dv_serdechnyj@guu.ru

ORCID: [0000-0003-3060-9469](https://orcid.org/0000-0003-3060-9469)

Denis V. Serdechnyy, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Head of the Laboratory of Digital and Intelligent Technologies for the Development of Territories of the Russian Federation, State University of Management, Moscow, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 14.05.2026; одобрена после рецензирования 07.08.2026; принята к публикации 14.08.2026.

The article was submitted 14.05.2026; approved after reviewing 07.08.2026; accepted for publication 14.08.2026.