

УДК 303.732:504.062

Научная статья

DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-54-67

EDN: KGNWNZ

Экологическое загрязнение земель как сложный технический объект системного анализа

Я. Э. Климавичус

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34

Аннотация. Актуальность исследования заключается в том, что при значительных масштабах загрязнения земель в России отсутствует единая методологическая основа, позволяющая рассматривать такие территории как сложные технические объекты. Большинство существующих исследований сосредоточено на отдельных аспектах – биоремедиации, физико-химических методах очистки, мониторинге или правовом регулировании. Эти работы носят фрагментарный характер и не обеспечивают целостного подхода, необходимого для интеграции данных и автоматизации проектирования. Новизна данного исследования состоит в том, что загрязненные земли впервые трактуются как технические системы, включающие физико-химические параметры, биологические процессы и нормативные регуляторы. В отличие от существующих работ, сосредоточенных на отдельных технологиях или правовых аспектах, в статье интегрированы системный анализ, типизация загрязнителей и учет неопределенности исходных данных, что формирует методологическую основу для автоматизации проектирования рекультивации.

Цель исследования заключается в обосновании необходимости рассматривать экологическое загрязнение земель как сложный технический объект системного анализа и формализации проектного процесса рекультивации на основе модели «входы → преобразования → состояния → выходы» с учетом неопределенности данных и нормативных регуляторов.

Результаты. В статье обосновано рассмотрение экологического загрязнения земель как сложного технического объекта системного анализа. Показано, что традиционный подход, основанный на понятии «нарушенные земли», фиксирует лишь факт деградации и не отражает системные характеристики объекта. В работе предложено формализованное описание загрязненных территорий через модель «входы → преобразования → состояния → выходы», позволяющую выявлять причинно-следственные связи между видами загрязнителей и откликами почвенно-экологических систем.

Выводы. Практическая значимость обозначается тем, что полученные результаты могут быть использованы проектными организациями и надзорными органами для сокращения сроков подготовки проектной документации, повышения точности расчетов и снижения рисков при согласовании проектов.

Ключевые слова: системный анализ, сложный технический объект, экологическое загрязнение, рекультивация земель, нефтяное загрязнение, тяжелые металлы, солевое загрязнение, неопределенность данных, нормативные регуляторы, автоматизация проектирования

Поступила 03.06.2025, одобрена после рецензирования 30.08.2025, принята к публикации 25.09.2025

Для цитирования. Климавичус Я. Э. Экологическое загрязнение земель как сложный технический объект системного анализа // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 5. С. 54–67. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-54-67

Environmental pollution of land as a complex technical object of systems analysis

J.E. Klimavičius

Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev
34 Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia

Abstract. The relevance of this study lies in the fact that, despite the significant level of land contamination in Russia, there is no unified methodological approach for considering such areas as complex technical facilities. Most existing studies focus on individual aspects—bioremediation, physicochemical cleanup methods, monitoring, or legal regulation. These studies are fragmented and do not provide the holistic approach necessary for data integration and automated design. The novelty of this study lies in its treatment, for the first time, of contaminated lands as technical systems, incorporating physicochemical parameters, biological processes, and regulatory controls. Unlike existing studies, which focus on individual technologies or legal aspects, this article integrates systems analysis, pollutant categorization, and consideration of initial data uncertainty, forming a methodological basis for automated remediation design.

Aim. Is to substantiate the need to consider environmental land pollution as a complex technical object of systems analysis and formalize the reclamation project process based on the "inputs → transformations → states → outputs" model, taking into account the uncertainty of data and regulatory frameworks.

Results. This article substantiates the need to consider environmental land pollution as a complex technical object of systems analysis. It is shown that the traditional approach, based on the concept of "disturbed lands," only captures the fact of degradation and does not reflect the systemic characteristics of the object. The paper proposes a formalized description of contaminated areas using the "inputs → transformations → states → outputs" model, which allows for the identification of cause-and-effect relationships between pollutant types and the responses of soil-ecological systems.

Conclusions. The practical significance of the obtained results is indicated by the fact that they can be used by design organizations and regulatory authorities to reduce the time required to prepare design documentation, improve calculation accuracy, and reduce risks during project approval.

Keywords: systems analysis; complex technical object; environmental pollution; land reclamation; oil pollution; heavy metals; salt pollution; data uncertainty; regulatory controls; design automation

Submitted on 03.06.2025,

approved after reviewing on 30.08.2025,

accepted for publication on 25.09.2025

For citation. Klimavičius J.E. Environmental pollution of land as a complex technical object of systems analysis. *News of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of RAS.* 2025. Vol. 27. No. 5. Pp. 54–67. DOI: 10.35330/1991-6639-2025-27-5-54-67

ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых проблем современного природопользования является противоречие между масштабом техногенного воздействия и ограниченными возможностями традиционных методов экологической коррекции. Мировая исследовательская активность подтверждает возрастающий интерес к проблеме рекультивации загрязненных земель [1].

Загрязнение земель нефтью, солями и тяжелыми металлами носит накопительный и системный характер: оно формирует устойчивые изменения в структуре почвы, гидрологическом балансе и биоценозе. В инженерной и экологической литературе такие явления долгое время описывались преимущественно через категорию «нарушенные территории». Однако подобный подход фиксирует лишь факт деградации, не раскрывая системных характери-

стик объекта и не позволяя формализовать процессы его функционирования и восстановления. Масштабы и пространственная неоднородность деградации почв подтверждаются данными официальной отчетности (рис. 1)

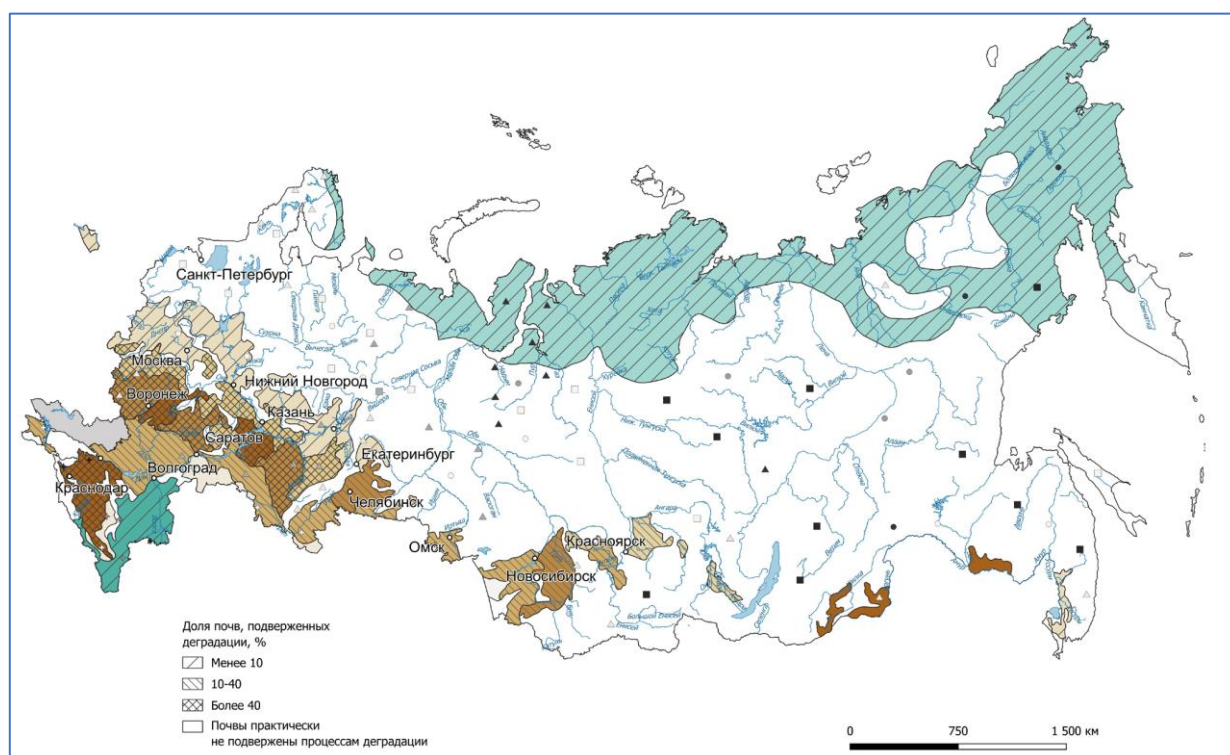


Рис. 1. Степень деградации почв на территории Российской Федерации¹

Fig. 1. The degree of soil degradation in the Russian Federation

Между тем опыт анализа сложных технических систем – в энергетике, автоматизированном производстве, информационных технологиях – показывает: корректное проектирование невозможно без представления объекта как системы, имеющей входы, преобразования, состояния и выходы. Отсутствие подобного подхода в области рекультивации затрудняет создание универсальных методик, ограничивает возможности цифровизации и снижает эффективность принимаемых решений.

В международной практике активно формируются системные и цифровые подходы к управлению почвенными ресурсами [3]². В США Агентство по охране окружающей среды (EPA) использует **Decision Support Tools (DSTs)** для моделирования, выбора технологий очистки и управления рисками на загрязненных территориях. В Европейском союзе реализуется **EU Soil Strategy for 2030**, а также разрабатывается проект **Soil Monitoring and Resilience Directive (SMRD)**, находящийся в стадии триалогов³ (2024), направленный на мониторинг и восстановление почв. В 2024 году был принят **Nature**

¹Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году». М.: Минприроды России, 2024. 540 с.

²European Commission. EU Soil Strategy for 2030. – Brussels: EC, 2021. – URL: https://environment.ec.europa.eu/topics/soil-health/soil-strategy-2030_en (дата обращения: 26.07.2025).

³European Commission. Proposal for Soil Monitoring and Resilience Directive (SMRD). – Brussels: EC, 2023. – URL: <https://epthinktank.eu/2024/01/29/soil-monitoring-and-resilience-directive-eu-legislation-in-progress> (дата обращения: 22.06.2025).

Restoration Law, закрепляющий обязательные цели по восстановлению экосистем, включая почвенные, к 2050 году.

Сравнительный анализ показывает, что зарубежные инициативы делают упор на цифровизацию и многокритериальные методы выбора технологий. В США системы DST (Decision Support Tools) интегрируют геоинформационные данные, модели миграции загрязнителей и базы технологий очистки, что позволяет формировать несколько сценариев и оценивать их риски. В EC Soil Strategy for 2030 и проект SMRD ориентированы на комплексный мониторинг, создание баз сравнимых данных и обязательное восстановление деградированных земель к целевым срокам. Российская практика пока остается более нормативно-ориентированной, но менее цифровизированной. Включение системного анализа в проектирование может сократить этот разрыв и приблизить отечественные методы к международным стандартам. Все эти инициативы свидетельствуют о том, что переход к системному анализу и цифровым технологиям в экологическом проектировании является общемировой тенденцией.

Актуальность исследования заключается в том, что при значительных масштабах загрязнения земель в России отсутствует единая методологическая основа, позволяющая рассматривать такие территории как сложные технические объекты⁴. Большинство существующих исследований сосредоточено на отдельных аспектах – биоремедиации, физико-химических методах очистки, мониторинге или правовом регулировании [3–5]. Эти работы носят фрагментарный характер и не обеспечивают целостного подхода, необходимого для интеграции данных и автоматизации проектирования.

Цель статьи заключается в обосновании необходимости рассматривать экологическое загрязнение земель как сложный технический объект системного анализа и формализации проектного процесса рекультивации на основе модели «входы → преобразования → состояния → выходы» с учетом неопределенности данных и нормативных регуляторов.

1. ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ КАК ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Системный анализ требует точной формализации внешних воздействий, определяющих поведение объекта [6–8]. В контексте рекультивации такими воздействиями являются загрязнители различной природы, которые задают исходные условия проектирования. Их типология критична для алгоритмизации проектных решений, так как именно физико-химические свойства загрязнителя определяют набор допустимых преобразований и характер целевых состояний.

Углеводородные соединения (нефть и нефтепродукты) занимают ведущее место среди поллютантов [9]. Они характеризуются многофазностью (жидкая, адсорбированная, растворенная и паровая формы), различной биodeградебельностью фракций, способностью к миграции в поровом пространстве. Высокое содержание смолисто-асфальтеновых веществ приводит к формированию устойчивых битумоподобных пятен, плохо поддающихся биодеструкции [10]. Для системного анализа важны такие показатели, как общее содержание нефтепродуктов, концентрация полиароматических углеводородов, доля легко летучих фракций, а также коэффициенты сорбции. В инженерной экологии нефтяное загрязнение часто рассматривается как аналог энергетической аварии: локальный выброс высокой плотности энергии, приводящий к нарушению всей системы.

⁴Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2023 году». М.: Минприроды России, 2024. 540 с.

Тяжелые металлы (свинец, кадмий, ртуть, медь и др.) формируют иной тип возмущающего воздействия. Их опасность связана с невозможностью биологического разложения и склонностью к аккумуляции в трофических цепях. Металлы могут находиться в почвах в различных формах: растворенной, ионообменной, связанной с органическим веществом или минеральной матрицей. Их подвижность зависит от кислотности, окислительно-восстановительных условий и наличия комплексообразователей. Системный подход требует не только фиксировать валовое содержание металлов, но и учитывать фракционный состав, так как именно он определяет экологическую доступность. В терминах управления такие загрязнители эквивалентны устойчивому дефекту в материале конструкции, который невозможно устранить простыми методами и который требует сложных компенсационных мер (иммобилизация, изоляция, капсулирование) [11].

Соли (хлориды и сульфаты натрия, магния, кальция) в системной модели представляют собой особый класс входных воздействий. В отличие от нефти или металлов они обладают высокой растворимостью, что делает их чрезвычайно мобильными во времени и пространстве. Минерализованные воды при разгерметизации коммуникаций или при сбросах способны быстро проникать вглубь профиля, вызывать осмотический стресс и разрушение структуры почвы. Для анализа критичны показатели суммарной минерализации, ионного состава, электропроводности, натриевой адсорбционной величины (SAR). По своей роли соли напоминают паразитные колебания в электрических цепях: даже небольшое превышение порога может вызвать разлад всей системы.

В условиях Самарской области к числу наиболее распространенных примеров можно отнести:

- **амбарные накопители буровых отходов** (Нефтегорский, Отрадный районы), формирующие хронические очаги нефтезагрязнения;
- **техногенные солонцы** вдоль трасс промышленных трубопроводов, где разгерметизация приводит к поступлению минерализованных вод и засолению пахотных земель;
- **старые промплощадки и зоны складирования отходов** (районы пригорода Самары и Новокуйбышевска), где фиксируются повышенные концентрации тяжелых металлов, устойчивые десятилетиями.

Эти примеры показывают, что региональная специфика накладывает ограничения на выбор технологий рекультивации и требует адаптации проектных решений к конкретным условиям.

Кроме того, особого внимания заслуживают многокомпонентные загрязнения. Например, сочетание нефти и солей приводит к наложению эффектов: углеводороды ограничивают доступ кислорода и препятствуют биодеструкции, а соли повышают подвижность отдельных тяжелых металлов и усиливают токсичность. Системный анализ требует здесь многокритериальной оптимизации, так как линейные меры управления не дают результата [12].

Источники задают конфигурацию потоков, через которые загрязнители поступают в систему. В системном анализе они рассматриваются как входные каналы, определяющие сценарии функционирования объекта.

Нефтедобывающие и перерабатывающие объекты формируют хронический тип загрязнения. Амбарные накопители буровых отходов, утечки трубопроводов, несанкционированные сбросы создают долгосрочную нагрузку, которая постепенно изменяет свойства почвы и грунтовых вод. В терминах системной теории это аналог «длительного возмущения», которое смещает систему из равновесного состояния.

Таблица 1. Типы загрязнений и отклик почвы (экосистемы)**Table 1.** Types of pollution and soil (ecosystem) response

Тип загрязнения	Характерные свойства и параметры	Отклик почвенной системы	Типовые меры рекультивации
Нефтяное (углеводородное)	Многофазность (жидкая, адсорбированная, паровая формы); частичная биодеструкция; высокое содержание смолисто-асфальтеновых фракций; показатели: общее содержание нефти, ПАУ, фракционный состав	Гидрофобизация профиля; снижение кислородного режима; угнетение микробиоты; деградация растительности	Биодеструкция (фиторемедиация, микробиологические препараты), сорбция органоминеральными сорбентами, промывка грунтов
Тяжелые металлы	Неразлагаемость; аккумуляция в трофических цепях; формы: ионная, связанная с органикой или минералами; подвижность зависит от pH и Eh; показатели: валовое и подвижное содержание	Токсичность для растений и микроорганизмов; снижение биологической активности; долговременное остаточное загрязнение	Иммобилизация (известкование, фосфатирование), изоляция, капсулирование
Солевое (засоление)	Высокая растворимость и миграция; разрушение структуры почвы; показатели: суммарная минерализация, ионный состав, EC, SAR	Осмотический стресс; деградация структуры и водопроницаемости; снижение продуктивности; риск эрозии	Промывка пресной водой, гипсование, внесение органики, дренаж
Многокомпонентное	Совмещение разных поллютантов (нефть + соли + металлы); взаимное усиление токсичности; необходимость многокритериального управления	Взаимное усиление негативных эффектов; каскадные деградиационные процессы; трудности прогнозирования и рекультивации	Комплексные меры: биодеструкция + промывка + иммобилизация; сценарный подход

Транспортно-логистические узлы и нефтебазы создают локальные очаги загрязнения с высокой концентрацией поллютантов в верхних горизонтах. Особенность таких участков – резкая пространственная ограниченность и сильная техногенная нарушенность. Их можно сопоставить с «локальными перегрузками» в технических сетях, которые при отсутствии своевременной компенсации быстро приводят к аварийному состоянию.

Аварийные события (разрывы трубопроводов, технологические инциденты) дают мощные разовые выбросы. Характер пятна определяется гидрологией и рельефом, а скорость инфильтрации требует экстренных мер. В системной аналогии это «импульсные воздействия», вызывающие переход системы в новое состояние за очень короткое время.

Солонцеватые и засоляемые территории формируются при сбросах минерализованных вод или при разгерметизации коммуникаций. В отличие от аварийных очагов здесь действует медленный, но устойчивый поток вещества, что соответствует понятию «квазистационарный вход» в системах управления.

Смешанные очаги с примесью тяжелых металлов характерны для старых промплощадок и зон хранения отходов. Их специфика – устойчивый токсикологический след, который сохраняется десятилетиями. В системном подходе это эквивалент «устойчивого дефекта конструкции», влияющего на все уровни модели.

Загрязнители изменяют состояние объекта на трех уровнях:

- **Физико-химическом** (рН, редокс-потенциал, минерализация, формы связывания металлов).
- **Агрофизическом** (структура почвы, водопроницаемость, плотность, капиллярность).
- **Биологическом** (активность микробиоты, продуктивность растительности, устойчивость биоценозов).

Каждый уровень имеет собственные индикаторы, но ключевым является их взаимосвязанность. Например, нефтяное загрязнение снижает кислородный режим почвы, что ведет к изменению микробного сообщества и в конечном счете к деградации растительности. Засоление нарушает структуру почвенных агрегатов, что ухудшает водопроницаемость и создает условия для эрозии. Тяжелые металлы снижают биологическую активность, а также вызывают долговременную токсичность, передаваемую по трофическим цепям.

В терминах системного анализа это можно рассматривать как **динамический отклик объекта на входные воздействия**. Подобно тому, как оборудование реагирует на перегрев или коррозию каскадной деградацией элементов, почва и биота реагируют на загрязнение цепочкой взаимосвязанных изменений. В обоих случаях процессы нелинейны и имеют пороговые эффекты: превышение определенного значения вызывает лавинообразные изменения.

В отличие от большинства технических систем экологические объекты подчиняются не только законам природы, но и **нормативно-правовым регуляторам**. Федеральные законы, постановления правительства, ГОСТы и СанПиН выполняют роль управляющих воздействий^{5, 6}. Их выполнение определяет целевые состояния системы: снижение концентраций загрязнителей до ПДК, восстановление плодородия, устойчивость биоценоза.

Системный анализ позволяет трактовать эти документы как «задатчики» в АСУ, задающие параметры допустимых состояний. Без их учета проектные решения будут неполными и не достигнут нормативного результата.

Загрязненные территории характеризуются высокой степенью неопределенности исходных данных:

- обследования фрагментарны;
- лабораторные анализы вариативны;
- экспертные заключения противоречивы.

В терминах системного анализа это соответствует управлению в условиях неполной информации. Подобные задачи решаются через фильтрацию, нормализацию данных, сценарный подход, привлечение экспертных систем. Аналогичные методы применяются в авиации, робототехнике и управлении рисками.

Все рассмотренные характеристики – множественность входов, разнообразие источников, многоуровневое воздействие, иерархичность и нелинейность, наличие регуляторов и высокая информационная неопределенность – позволяют квалифицировать загрязненный участок как **сложный технический объект системного анализа**. Такой подход формирует основу для формализации проектного процесса рекультивации и разработки интеллектуальных систем поддержки проектирования.

⁵ФЗ №7-ФЗ «Об охране окружающей среды». Принят 10.01.2002 (в ред. от 2024 г.).

⁶Постановление Правительства РФ №800 от 10.07.2018 «О проведении рекультивации и консервации земель».

2. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ КАК ИНСТРУМЕНТ ОПИСАНИЯ

Системный анализ представляет собой универсальный метод исследования объектов, обладающих множественностью факторов, обратными связями, нелинейной динамикой и высокой степенью неопределенности. Загрязненные территории относятся именно к такому типу объектов. Их невозможно описать ни чисто инженерными уравнениями, ни исключительно экологическими методами. Только системный подход позволяет увязать физико-химические процессы, биологические механизмы, нормативные ограничения и организационно-управленческие аспекты в единую модель.

Базовой моделью системного анализа является цепочка: входы – преобразования – состояния – выходы (В–П–С–В) (рис. 2). Она позволяет представить сложный объект в виде формализованной структуры, где каждый элемент играет свою роль.



Рис. 2. Схема системы (В-П-С-В) / **Fig. 2.** System diagram (V-P-S-V)

Для загрязненных территорий входы включают:

- концентрации нефтепродуктов, солей, тяжелых металлов;
- геологические и гидрологические характеристики;
- климатические параметры (температура, увлажнение, продолжительность вегетационного периода);
- техногенные нагрузки (наличие промышленных объектов, транспортных узлов);
- нормативные требования, задающие допустимые значения параметров.

В терминах инженерных систем входы – это аналог входных сигналов или возмущений. Так же, как в энергетике входом является нагрузка, в экологии – поступление загрязнителей и сопутствующих факторов.

Внутри системы протекают процессы, трансформирующие входные воздействия:

- физико-химические реакции (сорбция, десорбция, окисление, восстановление);
- миграция загрязнителей по профилю почвы и в грунтовые воды;

- разложение органических соединений микроорганизмами;
- инженерные воздействия при рекультивации (удаление грунта, промывка, внесение сорбентов).

Эти процессы формируют динамику изменения состояния. В системной аналогии это блок преобразователя, через который проходит входной сигнал.

Состояния описывают текущее положение объекта:

- физико-химические параметры (рН, редокс-потенциал, минерализация);
- агрофизические характеристики (структура почвы, плотность, капиллярность);
- биологические показатели (состояние микробиоты, биоразнообразие, продуктивность).

Состояния аналогичны текущему режиму функционирования технической системы: например, температуре двигателя или уровню напряжения в сети.

Выходы – это результаты, которые подлежат контролю:

- снижение концентраций загрязнителей до нормативных значений;
- восстановление плодородного слоя;
- формирование устойчивого биоценоза;
- возможность хозяйственного использования территории.

В управляемой системе выход – это тот параметр, ради которого функционирует весь контур регулирования.

В системном анализе регулятор – это элемент, который корректирует поведение системы и задает допустимые границы ее функционирования. В случае экологических объектов регуляторами выступают нормативно-правовые документы, устанавливающие целевые параметры и допустимые уровни загрязнения.

К примерам регуляторов можно отнести следующее:

- Федеральный закон «Об охране окружающей среды» задает общий правовой каркас.
- Постановление Правительства РФ № 800 (2018) регламентирует порядок проведения рекультивации и консервации земель.
- Постановление № 612 (2011) устанавливает критерии существенного снижения плодородия.
- ГОСТы Р 59070-2020, 59057-2020 определяют термины, принципы и требования к рекультивации.
- СанПиН 1.2.3685-21 регламентирует гигиенические нормативы для факторов среды.

В системной аналогии эти документы играют роль датчиков и эталонных сигналов: они определяют, каким должен быть «выход» системы. Несоблюдение нормативов означает, что система остается в недопустимом состоянии.

Так, если концентрация нефтепродуктов не снижается до ПДК, то объект считается не рекультивированным вне зависимости от затрат и усилий. Это подобно тому, как автоматизированная система регулирования температуры считается неисправной, если не может удержать параметр в заданных пределах.

Системный анализ требует достоверных данных о состоянии объекта. В случае загрязненных территорий источники информации чрезвычайно разнообразны и разнородны:

- Лабораторные исследования – результаты химического анализа проб почв, воды, растительности: содержание нефтепродуктов, тяжелых металлов, солей, гумуса.
- Данные мониторинга – регулярные наблюдения за ключевыми параметрами: рН, электропроводность, редокс-потенциал, подвижные формы калия и фосфора, биоиндикация.
- Проектно-изыскательские материалы – инженерно-экологические изыскания, карты загрязнения, отчеты подрядных организаций.

- Акты обследований – документы, фиксирующие состояние объекта на разных стадиях – до рекультивации, в процессе и после.

- Судебные и прецедентные данные – материалы, используемые при рассмотрении споров о нанесении экологического ущерба и обязанностях по восстановлению.

Эти источники подобны сенсорной подсистеме сложной технической системы. Как датчики в АСУТП передают информацию о температуре, давлении и скорости, так и лабораторные и мониторинговые данные дают сигнал о состоянии почвы и экосистемы.

Проблема: данные фрагментарны, разнородны, могут быть несовместимы по формату и точности. Решение: применение методов системного анализа – фильтрации, нормализации, сценарного моделирования, экспертных оценок – позволяет интегрировать их в единую базу знаний.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что системный анализ позволяет:

1. Структурировать описание загрязненных земель через модель «входы – преобразования – состояния – выходы».

2. Рассматривать нормативно-правовые документы как регуляторы, задающие целевые функции.

3. Интегрировать разнородные информационные источники в единую систему наблюдений и управления.

Тем самым экологическое загрязнение переводится из плохо формализованных явлений в класс управляемых систем, что открывает путь к автоматизации проектирования и созданию интеллектуальных технологий рекультивации.

3. НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ И НЕПОЛНОТА ДАННЫХ

Одной из ключевых особенностей экологических объектов, подвергшихся загрязнению, является высокая степень неопределенности исходной информации. В отличие от технических систем, где параметры и режимы могут быть строго измерены и воспроизведены, экологическая среда характеризуется вариативностью, фрагментарностью данных и множественностью источников, нередко противоречащих друг другу, что особенно проявляется на стадии отбора проб [13]. Для системного анализа это означает необходимость разработки специальных методов обработки информации, обеспечивающих достоверность и воспроизводимость проектных решений.

Первая проблема заключается в том, что обследования загрязненных участков редко носят комплексный характер. Чаще всего они проводятся выборочно:

- по ограниченному количеству точек отбора проб;
- в отдельные сезоны без учета межгодовой динамики;
- по ограниченному набору показателей (например, только по нефтепродуктам, без оценки биологической активности или солевого состава). Риск-ориентированные подходы позволяют повысить точность делиниации загрязненных участков [14].

В результате формируется неполная картина состояния системы. Это аналогично ситуации в технических науках, когда контролируется лишь один параметр (например, температура), тогда как другие (давление, вибрации, расход) остаются вне поля зрения. Управление системой по такой информации неизбежно ведет к ошибкам.

Информация о загрязненных территориях поступает из различных каналов, таких как лабораторные исследования, акты обследований, данные мониторинга, экспертных заключений, судебных решений. Эти источники отличаются:

- по методикам анализа (разные лаборатории могут применять отличающиеся стандарты, приборы и методы пробоподготовки);
- по точности и погрешности измерений;
- по формату представления (цифровые таблицы, текстовые отчеты, графические материалы);
- по времени получения (данные разных лет, сезонов, этапов проекта).

Такая разнородность делает невозможным их прямое сопоставление без предварительной обработки. В системной аналогии это соответствует ситуации, когда разные датчики передают сигналы в разных форматах и с разной точностью. Для интеграции необходима процедура нормализации и приведения данных к единому масштабу.

Для снижения неопределенности и обеспечения надежности проектных решений применяются следующие подходы:

- Нормализация данных. Приведение разнородных данных к единой системе координат (например, пересчет концентраций к единому стандарту пробоподготовки, унификация форматов представления).
- Верификация информации. Проверка данных на достоверность через повторные измерения, сопоставление с независимыми источниками, использование контрольных проб.
- Сценарный подход. Формирование нескольких возможных сценариев состояния объекта (оптимистического, пессимистического, реалистического). Это позволяет учесть диапазон возможных изменений и снизить риск неверных решений.
- Привлечение экспертных систем. Использование алгоритмов искусственного интеллекта, баз знаний и экспертных методик для интерпретации фрагментарных данных. В экологии это особенно важно, так как не все процессы могут быть строго измерены, но многие могут быть предсказаны на основе аналогий и прецедентов.
- Методы статистической обработки. Применение математических методов (регрессионный анализ, кластеризация, факторный анализ) для выявления закономерностей в разнородных массивах данных.

Системный анализ играет ключевую роль в работе с неполной и неопределенной информацией. Его методы позволяют:

- выявлять причинно-следственные связи даже при отсутствии полного массива данных;
- интегрировать данные из разнородных источников в единую модель;
- учитывать динамику изменений и строить прогнозные сценарии;
- обеспечивать устойчивость проектных решений в условиях высокой вариативности исходной информации.

По сути, системный анализ выполняет функцию «фильтра» и «интерпретатора» информации, без которого управление загрязненными территориями превращается в хаотический и малоэффективный процесс.

Неопределенность и неполнота данных являются фундаментальной характеристикой экологических систем, подвергшихся загрязнению. Их игнорирование ведет к ошибочным проектным решениям и снижает эффективность рекультивации. Системный анализ обеспечивает методологическую основу для преодоления этих проблем, позволяя нормализовать, верифицировать и интегрировать разнородные данные, а также формировать устойчивые сценарные модели. Это делает возможным переход от фрагментарных инженерных мер к комплексному и воспроизводимому проектированию природоохранных мероприятий.

4. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Обосновано, что загрязненные земли целесообразно рассматривать как **сложные технические объекты системного анализа**, что позволяет формализовать процессы их деградации и восстановления.

2. Проведена **типизация загрязнителей** (нефть, соли, тяжелые металлы, многокомпонентные смеси) и их откликов в почвенно-экологических системах, предложено дополнение таблицы указанием типовых мер рекультивации.

3. На региональном примере Самарской области показаны **специфические формы деградации** (амбарные накопители буровых отходов, техногенные солонцы), что подчеркивает необходимость адаптации проектных решений к конкретным условиям.

4. Проведен сравнительный анализ с зарубежными подходами (EPA DSTs, EU Soil Strategy, Nature Restoration Law), что подтвердило общемировую тенденцию перехода к цифровым и системным методам экологического проектирования.

5. Выявлена значимость учета **неопределенности и фрагментарности данных**; предложены направления ее преодоления на основе нормализации, верификации и цифровых технологий (машинное обучение, цифровые двойники).

6. Показано, что системный подход формирует методологическую основу для автоматизации проектирования рекультивации и может сократить разрыв между нормативно-ориентированной российской практикой и международными стандартами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что экологическое загрязнение земель следует рассматривать не как частный факт деградации, а как сложный технический объект, характеризующийся множественностью факторов, нелинейной динамикой и высокой степенью неопределенности исходных данных. Такой подход позволяет уйти от описательной категории «нарушенные территории» и перейти к формализованному представлению, где загрязненный участок описывается через модель «входы → преобразования → состояния → выходы».

На основе системного анализа выделены ключевые типы загрязнителей и их отклики, а также предложены типовые меры рекультивации. Региональные примеры (Самарская область) подтвердили необходимость адаптации проектных решений к конкретным условиям, а сравнительный анализ зарубежных подходов показал, что интеграция системного анализа и цифровых технологий является общемировой тенденцией, что делает данный подход перспективным и для российской практики.

Таким образом, предложенный в статье подход обеспечивает переход от разрозненных инженерных мер к согласованным и формализованным проектным методикам, основанным на принципах системного анализа. Он формирует основу для внедрения интеллектуальных систем поддержки проектных решений, сокращения сроков подготовки проектной документации, повышения точности расчетов и снижения экологических и правовых рисков. Экологическое загрязнение земель предложено рассматривать как объект системного анализа, где региональная специфика (на примере Самарской области) увязана с международными практиками цифровизации и управления почвенными ресурсами. Такой подход придает исследованию целостность, подтверждает его научную новизну и формирует методологическую базу для автоматизации процессов рекультивации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gao J., Zhang Y., Li W. Global research on contaminated soil remediation: a bibliometric analysis // *Land*. 2022. Vol. 11(9). P. 1581. DOI: 10.3390/land11091581
2. Smith P., House J. I., Bustamante M. et al. Global change pressures on soils from land use and management // *Global Change Biology*. 2019. Vol. 25(2). Pp. 563–581. DOI: 10.1111/gcb.13068
3. Жидков А. Н., Коженков Л. Л. Рекультивация нарушенных земель // *Лесохозяйственная информация*. 2019. №3. С. 134–145.
4. Шамсутдинова Л. Р., Белан Л. Н., Акбалина З. Ф. Реабилитация загрязненных промышленных территорий (на примере ОАО «Уфакхимпром») // *Вестник Башкирского университета*. 2013. Т. 18. № 4. С. 1092–1094. EDN: RUOZJJ
5. Носова М. В., Середина В. П., Стовбунник С. А. Опыт проведения локальных рекультивационных мероприятий по восстановлению техногенно-засоленных почв // *Принципы экологии*. 2024. № 3. С. 61–71. DOI: 10.15393/j1.art.2024.14964
6. Бертуланфи Л. Общая теория систем: критический обзор. М.: Прогресс, 1969. 296 с.
7. Садовский В. Н. Основания общей теории систем. М.: Наука, 1974. 280 с.
8. Аверьянов А. Н. Системное познание мира: методологические проблемы. Политиздат, 1985. 242 с.
9. Zou Y., Wang L., Li J. Remediation of crude oil contaminated soil through an integration of chemical and biological treatments // *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 905. 167271. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170756
10. Минникова Т. Ю., Русева А. С., Колесников С. И. Оценка ферментативной активности нефтезагрязненного чернозема после биоремедиации // *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2022. Вып. 5. DOI: 10.26897/0021-342X-2022-5-5-20
11. Lee H., Park S., Kim J. Recent developments and prospects of sustainable remediation treatments for major contaminants in soil: a review // *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 912. P. 164713. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168769
12. Abrams F., Rossi A., Tzoulis A. Multi-criteria decision analysis to support the remediation of polluted soils: a review of case studies // *Land*. 2024. Vol. 13(6). P. 887. DOI: 10.3390/land13060887
13. Glavič-Cindro D. et al. Comparison of different approaches of soil sampling uncertainty determination // *Applied Radiation and Isotopes*. 2023. Vol. 194. P. 110682. DOI: 10.1016/j.apradiso.2023.110676
14. Tao H., Zhao D., Luo L. A risk-based approach for accurately delineating the extent of contaminated soil // *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 921. P. 167829. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168231

REFERENCES

1. Gao J., Zhang Y., Li W. Global research on contaminated soil remediation: a bibliometric Analysis. *Land*. 2022. Vol. 11(9). P. 1581. DOI: 10.3390/land11091581
2. Smith P., House J.I., Bustamante M. et al. Global change pressures on soils from land use and management. *Global Change Biology*. 2019. Vol. 25(2). Pp. 563–581. DOI: 10.1111/gcb.13068
3. Zhidkov A.N., Kozhenkov L.L. Reclamation of disturbed lands. *Forestry Information*. 2019. No. 3. Pp. 134–145. (In Russian)
4. Shamsutdinova L.R., Belan L.N., Akbalina Z.F. Rehabilitation of contaminated industrial areas (on the example of Ufakhimprom OJSC). *Bulletin of Bashkir University*. 2013. Vol. 18. No. 4. Pp. 1092–1094. EDN: RUOZJJ. (In Russian)

5. Nosova M.V., Seredina V.P., Stovbunik S.A. Experience in carrying out local reclamation measures to restore technogenically saline soils. *Principles of Ecology*. 2024. No. 3. Pp. 61–71. DOI: 10.15393/j1.art.2024.14964. (In Russian)
6. Bertalanffy L. *Obshchaya teoriya sistem: kriticheskiy obzor* [General Systems Theory: A Critical Review]. Moscow: Progress, 1969. 296 p. (In Russian)
7. Sadovsky V.N. Foundations of General Systems Theory. Moscow: Nauka, 1974. 280 p. (In Russian)
8. Averyanov A.N. *Sistemnoye poznanie mira: metodologicheskiye problemy* [Systems Cognition of the World: Methodological Problems]. Politizdat, 1985. 242 p. (In Russian)
9. Zou Y., Wang L., Li J. Remediation of crude oil contaminated soil through an integration of chemical and biological treatments // *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 905. 167271. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.170756
10. Minnikova T.Yu., Ruseva A.S., Kolesnikov S.I. Evaluation of the enzymatic activity of oil-contaminated chernozem after bioremediation. *Bulletin of the Timiryazev Agricultural Academy*. 2022. No. 5. DOI: 10.26897/0021-342X-2022-5-5-20. (In Russian)
11. Lee H., Park S., Kim J. Recent developments and prospects of sustainable remediation treatments for major contaminants in soil: a review. *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 912. P. 164713. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168769
12. Abrams F., Rossi A., Tzoulis A. Multi-criteria decision analysis to support the remediation of polluted soils: a review of case studies. *Land*. 2024. Vol. 13(6). P. 887. DOI: 10.3390/land13060887
13. Glavič-Cindro D. et al. Comparison of different approaches of soil sampling uncertainty determination. *Applied Radiation and Isotopes*. 2023. Vol. 194. P. 110682. DOI: 10.1016/j.apradiso.2023.110676
14. Tao H., Zhao D., Luo L. A risk-based approach for accurately delineating the extent of contaminated soil. *Science of the Total Environment*. 2024. Vol. 921. P. 167829. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168231

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Funding. The study was performed without external funding.

Информация об авторе

Климавичус Ярослав Эдвардович, аспирант, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева;
443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34;
yklamavichus@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6571-1266>, SPIN-код: 4114-0615

Information about the author

Yaroslav E. Klimavičius, Postgraduate Student, Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev;
34 Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia;
yklamavichus@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6571-1266>, SPIN-code: 4114-0615