

УДК 005:631.4

DOI: 10.18522/2308-9709-2026-55-21

КОНЦЕПЦИЯ «ЖИЗНЬ КАК ВЫЧИСЛЕНИЕ» В СИСТЕМНОМ АНАЛИЗЕ ПОЧВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ (ОБЗОР). ЧАСТЬ 1

В.А. Чистяков^{1,2,3}, С.Н. Горбов^{1,4}, А.Б. Брень^{2*}, Т.В. Вардуни¹, М.Ю. Одабашян²,
О.С. Безуглова^{1,5}

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия

²Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону, Россия

³ Университет Петра Великого Политехнический университет (СПбПУ), Санкт-Петербург, Россия

⁴Научно-технологический университет «Сириус», Федеральная территория Сириус, Россия;

⁵Федеральный Ростовский аграрный научный центр
brenanzhelika@yandex.ru*

Аннотация

Перспективный аналитический обзор, цель которого – обосновать возможность применения для изучения сложной динамики почвенных процессов нового междисциплинарного подхода, основанного на концепции «жизнь как вычисление» (life-as-computation). В первой части обзора рассматривается потенциал применения метафоры и методологического аппарата концепции «жизнь как вычисление» к фундаментальным проблемам современного почвоведения, связанным с абиотической деградацией почв, динамикой органического вещества и влиянием климатических изменений. На основе анализа актуальных источников систематизированы современные вызовы, включая эрозию, засоление, переуплотнение, дегумификацию и трансформацию водно-теплового режима почв. На основе интегративного анализа, объединяющего методы теоретической биологии, биоинформатики и теории информации, показано, что к почве применим подход, интерпретирующий ее как вычислительную сеть, где биологические и химические процессы представляют собой алгоритмические взаимодействия. Таким образом открываются возможности для разработки более точных прогностических моделей. Эти модели могут быть использованы для оптимизации сельскохозяйственных практик и управления почвенными ресурсами.

Ключевые слова

Почвоведение, деградация почв, органический углерод, изменение климата, эрозия, вычислительная парадигма, системный анализ, педогенез.

Введение

Одно из важных достижений современного естествознания – признание того, что почва является сложной саморегулирующей системой, оказывающей глобальное влияние на биосферу в целом. Почвоведение сегодня трансформируется в ключевую интегрирующую науку о Земле, изучающую не просто верхний слой литосферы – педосферу, а критически значимую зону планеты – тонкую, динамичную и жизненно необходимую оболочку, функционирующую в условиях перехода от техносферы к ноосфере (Вернадский, 2004). Через «почвенные секторы» циклов углерода и азота проходят основные составляющие баланса генерации и связывания парниковых газов, которые в свою очередь, оказывают существенное влияние на климат, как на микроуровне, так и на уровне общепланетарных проявлений (Nunes et al., 2020). Почва выступает не просто как субстрат для жизнедеятельности, но и как важнейший фактор формирования условий для существования всех форм жизни, который вносит определяющий вклад в поддержание биоразнообразия (Добровольский, Чернов, 2011). Почва обладает способностью сохранять, перерабатывать и передавать нутриенты, необходимые для аграрного производства. Именно поэтому 95% человеческой пищи, по данным ФАО (FAO, 2015), создаётся благодаря эксплуатации её плодородия – напрямую или опосредованно. Это делает почву важнейшей составляющей техносферы.

Для современного почвоведения характерен переход от потребительского антропоцентризма – почва, как ресурс для человека, к экоцентризму: человек – часть почвенно-биосферной системы (Добровольский, 2010; Соколов, 2013). В итоге появляются новые направления, спектр которых свидетельствует о том, что почвоведение больше не сводится к обеспечению сельскохозяйственного производства, а становится ядром наук о Земле, объединяя биогеохимию, экологию, климатологию и цифровые технологии.

Главный экзистенциальный вопрос современного почвоведения, определяющий как теоретическую, так и практическую его значимость: как сохранить почву – основу жизни – в условиях антропогенного прессинга? Ответ требует не только мобилизации возможностей естествознания, но и определенного этического переосмысления, признания того, что почва – не просто ресурс, а наследие и условие существования биосферы.

Таким образом, почвоведение XXI века – это не просто дисциплина, а мировоззрение, признающее, что судьба человечества во многих аспектах зависима (ФАО, 2022) от тонкого слоя почвы – тончайшей оболочки,

представляющей собой «буквально пленку на поверхности земной суши толщиной всего один – два метра» (Добровольский, 2010). Почвенная наука становится мостом между естественными и гуманитарными науками, предлагая не только технологические решения, но и новую этику отношения к Земле.

Современное почвоведение подходит к методологической трансформации, расширяя фокус с преимущественно прикладных агрономических задач к системному изучению почвы как динамичной и интегрированной части биогеоценоза, где ключевое значение имеют взаимодействия между живым веществом и минеральными компонентами. Необходимость формализации науки о почве для её дальнейшего развития отмечается в числе приоритетных задач (Морозов, 2007; Targulian, Krasilnikov, 2007). Для решения этой задачи могут быть привлечены синтетические концепции из смежных областей знания. Одной из таких междисциплинарных концепций, обладающей значительным эвристическим потенциалом, является парадигма «жизнь как вычисление» (англ. *life-as-computation*), развиваемая в рамках теоретической биологии, биоинформатики и исследований сложных систем (Lloyd, 2006; Zenil, 2013). Данная концепция предлагает рассматривать фундаментальные биологические процессы через призму информационных потоков, алгоритмических взаимодействий и вычислительных принципов.

Применительно к почвоведению это открывает возможность интерпретировать почвенную экосистему как сложную распределённую вычислительную сеть. В этой сети абиотические и биотические компоненты (минеральная матрица, органическое вещество, микроорганизмы, корни растений) функционируют как взаимосвязанные узлы, обменивающиеся сигналами и ресурсами, что в совокупности можно рассматривать как форму обработки информации. Например, хорошо изученные микоризные сети демонстрируют способность к эффективной передаче ресурсов и сигналов между растениями, что обеспечивает системную оптимизацию и может быть описано в терминах сетевых алгоритмов (Simard et al., 1997; Gorzelak et al., 2015). Формализация подобных процессов с использованием аппарата теории информации, теории сложных сетей и вычислительного моделирования может способствовать созданию более точных и предсказательных моделей почвенных систем.

Ключевое потенциальное преимущество такого подхода – возможность улучшенного прогнозирования и управления почвенными процессами в условиях антропогенных изменений. Если устойчивость почвы к деградации или её функцию в глобальном цикле углерода рассматривать как эмерджентные свойства сложной адаптивной системы, то их анализ в терминах вычислительной

надёжности, алгоритмической сложности и устойчивости сетей может предоставить новые инструменты для моделирования (применение методов искусственного интеллекта, оптимизации и вычислительного моделирования для решения проблем устойчивого развития, включая экологические системы (см. обзор Gomes, 2009). Это особенно актуально для решения таких глобальных задач, как климатическое регулирование (роль почвы как резервуара углерода) и обеспечение продовольственной безопасности. Например, моделирование динамики и метаболических сетей почвенных микробных сообществ как «вычислительных ансамблей» (или как компонентов цифровых моделей почвенных профилей) могло бы способствовать оптимизации сельскохозяйственных практик, направленных на снижение объёмов вносимых удобрений без потери продуктивности. Таким образом, вычислительные модели могли бы стать связующим звеном между системным экоцентрическим мировоззрением и практическими агроэкологическими решениями.

Однако важно учитывать принципиальные методологические ограничения: биологические системы обладают эмерджентными, исторически обусловленными и контекстно-зависимыми свойствами, которые не всегда могут быть полностью редуцированы к детерминированным алгоритмам (Noble, 2006). Признавая это, мы полагаем, что сама постановка вопроса о вычислительной природе биологических процессов может быть эвристически плодотворной. Примером служит наше предшествующее обсуждение (Чистяков и др., 2025), где мы рассмотрели гипотетическую возможность использования онколитических вирусов и модифицированных бактерий в качестве «биовычислительных платформ». Несмотря на предварительный характер этих идей, сам исследовательский ракурс — попытка увидеть в биологической системе алгоритмические основания — представляется нам заслуживающим внимания и развития в других дисциплинах.

Распространение подобного ракурса на почвоведение позволяет задаться вопросом: в какой мере методологический аппарат теории вычислений и сложных сетей способен обогатить понимание педосферных процессов? Поиск ответа на этот вопрос, на наш взгляд, может стимулировать создание новых прогностических моделей, отвечающих вызовам антропоцена.

Задача данного обзора — проанализировать и обобщить потенциал, возможные пути применения и ограничения концепции «жизнь как вычисление» применительно к системному анализу ключевых почвенных процессов и решению актуальных проблем современного почвоведения. Наше видение

фундаментальной проблематики современного почвоведения и определяемого спектра задач кратко отражено в табл. 1.

Таблица 1. Главные проблемы и исследовательские задачи современного почвоведения

Исследовательские задачи	Источники информации
1. Деградация почв (эрозия, засоление, загрязнение, переуплотнение)	
1.1 Разработка моделей прогнозирования эрозии под влиянием климатических изменений	Канатьева и др., 2010; Соболев, 2016; Koza et al, 2021; Гаевая, Безуглова, 2024; Senanayake, 2022; Jamil et al. 2025; Belhaj et al. 2025; Mohammed, 2025.
1.2 Изучение механизмов естественного и антропогенного засоления почв и разработка методов их ремедиации	Лебедева, Николаев, 2020; Носова и др., 2024; Руководство по управлению засоленными почвами, 2017; Wang et al., 2025; Xiao et al., 2025.
1.3 Оценка влияния тяжёлой техники на уплотнение почв и поиск альтернативных методов землепользования	Коновалов и др., 2017; Tóth et al., 2007; Schäffer et al. 2007; Horn et al., 2024; Liebhard et al., 2025; Yao et al., 2025
1.4 Разработка биологических и химических методов очистки загрязнённых почв	Kurashvili et al. 2016; Костина и др., 2009; Васильева и др., 2024; Olayiwola et al., 2023; Zhao et al., 2024; Aguilar-Garrido et al. 2025; Wu et al., 2025a.
2. Потеря органического вещества и снижение плодородия	
2.1 Изучение динамики дегумификации для разных агроэкосистем и разработка стратегий сохранения почвенного плодородия	Ивашенко, Павлюшин, 2017; Сычев и др., 2020; Тарасов, Тарасов, 2021.
2.2 Разработка методов повышения содержания органического углерода в почвах	Кудеяров, 2022; Romanenkov et al., 2024; Гаевая, Безуглова, 2025; Kama et al., 2025; Parvin et al., 2025; Wu et al., 2025b; Zhou et al., 2025.
2.3 Исследование влияния различных систем земледелия на плодородие (No-Till, сидерация, агролесоводство, биологическое земледелие)	Казеев и др., 2020; Женченко и др., 2020; Ивонин, 2024; Sondag et al., 2025; Sá de Moraes et al., 2025.
3. Влияние изменения климата на внутрипочвенные процессы	
3.1 Моделирование изменения водного режима почв в условиях учащающихся засух и экстремальных осадков	Щедрин и др., 2022; Voulanas et al., 2022.
3.2 Изучение роли почв как источника или поглотителя парниковых газов	Федоров и др., 2021; Zhao et al., 2025; Zheng et al., 2025; Yan et al., 2025.
3.3 Разработка адаптивных систем землепользования для минимизации климатических рисков	Суховеева, 2020; Коковихин и др., 2023; Теймуров и др., 2024.
4. Биоразнообразие почв и его роль в функционировании экосистем	

4.1 Изучение взаимосвязей между микробными сообществами, растениями и элементарными почвообразовательными процессами	Кожевин, 2023; Комаров, Безуглова, 2025; Bahram et al., 2018; Balestrini et al., 2024; Tian et al., 2024; Wang et al., 2024; Williams et al., 2025
4.2 Разработка методов оценки биоразнообразия почвенной биоты	Добровольский, Чернов, 2011; Абдурахманов, 2013; Терехова и др., 2023; Mendes et al., 2011; Blakemore, 2024; Russell et al., 2024; Xing et al., 2024
4.3 Исследование влияния агрохимикатов и ГМО на почвенные микроорганизмы	Чернов, Семенов, 2021; Заргарян и др., 2022; Tsiafouli et al., 2015; Turrini et al., 2015; Husaini, Sohail, 2024; Sawant et al., 2025
5. Урбанизация и антропогенная трансформация почв	
5.1 Разработка классификации городских почв, особенности генезиса и методов их рекультивации.	Прокофьева и др., 2014; Апарин, Сухачева, 2015; Прокофьева, Герасимова, 2018; Прохоров, 2015; Горовцов и др., 2018; Nissim, Labrecque, 2021.
5.2 Изучение влияния городской инфраструктуры на физические свойства почв и их гидрологический режим	Росликова, 2017; Безуглова и др., 2018; Суюндуков и др., 2022
5.3 Оценка потенциала городских почв для создания зеленой инфраструктуры	Кононова, 2024; Горбов и др., 2025; Isola et al., 2024; Lv et al., 2025
5.4 Усиление протекторных функций городских почв	Горбов, 2018; Горбов, Безуглова, 2019; Неведров и др., 2024
6. Оптимизация землепользования и устойчивое сельское хозяйство	
6.1 Разработка цифровых моделей почвенного плодородия для точного земледелия	Рухович и др., 2021; Якушев и др., 2021; Семизоров и др., 2024
6.2 Оценка долгосрочного влияния монокультур на сохранение почвенного плодородия	Zhang et al., 2020; Стулин и др., 2020; Скороходов, 2022; Reidsma et al., 2023
7. Водные ресурсы и почвенно-гидрологические процессы	
7.1 Моделирование инфильтрации и испарения воды в различных типах почв	Муромцев и др., 2014; Шеин и др., 2015; Рязанова и др., 2023; Zheng et al., 2025
7.2 Разработка методов борьбы с опустыниванием и деградацией засушливых земель	Чурсин, Незванова, 2016; Вайчулис и др., 2021; Kulik, Vlasenko, 2024
7.3 Исследование влияния повышенного гидроморфизма на внутрипочвенные процессы и на почвенное биоразнообразие	Новикова, Назаренко, 2007; Добровольский, Чернов, 2011; Чевердин, Титова, 2020
8. Взаимодействие педосферы и биосферы в глобальных биогеохимических циклах	
8.1 Количественная оценка вклада почв в круговорот биогенных элементов	Суховеева, 2017; Баранов, 2022

8.2 Изучение роли почв в процессах секвестрации углерода	Кудеяров, 2023; Enebe et al., 2025; Jiang et al., 2025; Xue et al., 2024
8.3 Разработка моделей взаимодействия в системе «почва-растения-атмосфера»	Панкова и др., 2018; Иващук и др., 2023; Oishy et al., 2025
9. Развитие методов диагностики и мониторинга почв	
9.1 Разработка дистанционных методов оценки состояния почв и почвенного покрова (тематически связано с 6.1)	Терехова и др., 2023; Шоба и др., 2023; Musasa et al., 2025; Yang et al., 2025
9.2 Создание баз данных и ГИС-систем для прогнозирования изменения состояния различных типов почв	Шоба и др., 2023; Nikiforova, 2024
9.3 Применение искусственного интеллекта для анализа баз данных ключевых компонентов почв	Свецкий, 2022; Федосов и др., 2023; Скворцов и др., 2023; Senthil et al., 2025

Цель первой части обзора – проанализировать потенциал и ограничения применения концепции «жизнь как вычисление» к системному анализу процессов физико-химической деградации почв, динамики органического вещества и реакции почв на климатические изменения. Особое внимание уделяется возможностям моделирования этих процессов с использованием алгоритмических и сетевых подходов, а также перспективам создания прогностических систем для адаптации агроэкосистем к глобальным вызовам.

Деградация почв (эрозия, засоление, загрязнение, переуплотнение)

В рамках развиваемого нами подхода почвенная экосистема рассматривается как сложная адаптивная система, функционирование которой может быть описано в терминах информационных потоков и алгоритмических взаимодействий. В качестве аналогии можно рассмотреть работу бактериальных сообществ, демонстрирующих коллективное поведение и самоорганизацию, что интерпретируется некоторыми авторами как форма биологического вычисления (Ben-Jacob et al., 2000). Перспективным направлением представляется применение дискретных моделей, таких как клеточные автоматы, для имитации динамики почвенных процессов, включая эрозию: концепция позволяет моделировать почвенные процессы таким образом, что каждый участок почвы рассматривается как элемент вычислительной сети (Gholami et al., 2021). Клеточные автоматы применяются, например, в моделях стоков и растительного покрова, для прогнозирования динамики эрозии на склонах с учетом климатических факторов

(Sheng et al., 2025; Liu et al., 2022). Подобные модели позволяют учитывать пространственную неоднородность и нелинейные взаимодействия факторов. В ряде исследований показана эффективность использования машинного обучения для прогнозирования эрозионных рисков на основе многомерных данных (Reichstein et al., 2019; Senanayake et al., 2022).

Кроме того, изучение адаптивных реакций микробных сообществ на абиотические стрессы, такие как засоление, позволяет рассматривать их как сложные сети взаимодействий (Ben-Jacob et al., 2000; Norris et al., 2011) со значительным регуляторным потенциалом, реализуемым посредством биохимических преобразований, и, следовательно, являющиеся точкой приложения для биоинженерии (Wang et al., 2025; Wadoux et al., 2025). Хотя прямое применение концепции «вычисления» на данном этапе пока остается гипотетическим и требует дальнейшей экспериментальной и теоретической верификации, это открывает перспективы для разработки новых стратегий биоремедиации, основанных на управлении составом и активностью почвенной микробиоты.

Потеря органического вещества и снижение плодородия

В рамках предлагаемой вычислительной парадигмы динамика формирования гумусовых соединений в процессе трансформации органических остатков на ранних этапах хорошо аппроксимируется простым линейным трендом, причем накопление гуминовых кислот и фульвокислот в разных средах идет практически с одинаковой скоростью (Комаров, Безуглова, 2025), а в агроэкосистемах динамика гумуса может быть представлена как сложный вычислительный процесс, где почвенные микроорганизмы выступают в роли биологических процессоров, преобразующих органический материал в соответствии с программными алгоритмами метаболических сетей (Schimel, Schaeffer, 2012).

Изучение динамики гумуса с позиций вычислительной биологии позволяет разработать принципиально новые модели его сохранения. Современные исследования демонстрируют, что процессы гумификации и минерализации органического вещества могут быть описаны как многоуровневая вычислительная система. Так, авторы работы (Wieder et al., 2015) предлагают рассматривать в этом контексте процессы гумификации и минерализации органического вещества. В этой системе молекулярные взаимодействия представляют элементарные логические операции, микробные сообщества функционируют как распределенные процессоры, а потоки углерода и питательных веществ

аналогичны информационным потокам. Для реализации этой концепции в глобальных моделях земной системы (ESMs) и создания надежных моделей, учитывающих активность микробов, они предлагают конкретную дорожную карту. Она включает: (1) разработку единых руководств по параметризации моделей и стандартизации выходных данных для обеспечения сравнимости моделей; (2) создание структур для бенчмаркинга и интеграции моделей с данными из курируемых репозиторий с целью валидации и оптимизации параметров; (3) применение методов масштабирования для внедрения «микробных» модулей биогеохимии почвы в ESMs, что позволяет, по их мнению, связать микроскопические процессы с прогнозами на десятилетия и века.

Особую перспективу представляет применение концепции биокомпьютинга к разработке методов карбонового земледелия. Исследования показывают, что управление микробными сообществами как живыми вычислительными системами позволяет оптимизировать процессы связывания атмосферного углерода в почве. Например, программирование метаболических путей ризосферных микроорганизмов через подбор растительных ассоциаций может значительно увеличить эффективность углеродного депонирования (Liang et al., 2017).

Анализ влияния различных систем земледелия (No-Till, сидерация, агролесоводство, биологическое земледелие) на почвенное плодородие с позиций теории сложных систем открывает новые возможности для оптимизации агротехнологий. Каждая из этих систем представляет собой уникальную "вычислительную архитектуру", по-разному организующую потоки вещества и энергии. No-Till способствует сохранению естественных алгоритмов почвообразования (Женченко и др., 2020; Казеев и др., 2020; Sá de Moraes, 2025). Сидерация вводит дополнительные вычислительные модули за счет увеличения биомассы растений-сидератов. Агролесоводство создает сложные сети взаимодействий (Кулик и др., 2023). Биологическое земледелие позволяет регулировать состав ризосферных микроорганизмов в соответствии с запросами растений (Полиенко и др., 2017). Интеграция этих подходов позволит освоить адаптивно-ландшафтные системы земледелия (Кирюшин, 2019, 2024), которые можно рассматривать как сложные, распределённые биогибридные вычислительные системы.

Перспективным направлением является разработка цифровых двойников почвенных экосистем, интегрирующих данные о микробном разнообразии, химическом составе и физических свойствах почв. Такие модели позволяют тестировать различные сценарии управления органическим веществом в

Чистяков В. А., Горбов С. Н., Брень А. Б., Вардуни Т. В., Одабашян М. Ю., Безуглова О. С., Концепция «жизнь как вычисление» в системном анализе почвенных процессов (обзор). часть 1 // «Живые и биокосные системы». – 2026. – № 55; URL: <https://jbks.ru/archive/issue-55/article-21>; DOI: 10.18522/2308-9709-2026-55-21

виртуальной среде до их практического применения (Дергачева, 2021; Савченко, Лукин, 2024; Башкин, 2024).

Влияние изменения климата на внутрипочвенные процессы

Концепция рассмотрения элементарных почвенных процессов как вычислительной системы (Bonan, Doney, 2018) предлагает новый подход к моделированию климатических воздействий, где параметры почвы (влажность, содержание органического вещества, активность микробиоты) интерпретируются как динамические переменные. Такой подход особенно важен для анализа нелинейных откликов почвенных экосистем, которые трудно описать традиционными детерминированными моделями. Исследования (Wang et al., 2025, Zhou et al., 2025, Xu et al., 2025) показывают, что учет высокой сложности взаимодействий в почве требует применения современных вычислительных методов, включая, наряду с big data, вероятностные и параллельные алгоритмы, аналогичные тем, что используются в квантовых вычислениях.

Хотя прямое применение квантовой механики к почвенным процессам пока не обосновано, методы, сходные с квантовыми вычислениями, могут быть полезны для обработки больших объемов данных и моделирования многокомпонентных систем. Например, идеи оптимизации вычислений, заимствованные из квантовых алгоритмов, помогают эффективнее учитывать взаимосвязи между влажностью, температурой и биологической активностью почвы (Wieder et al., 2018). Это особенно важно для прогнозирования критических переходов, таких как резкие изменения содержания углерода или деградация почв при климатических аномалиях.

Перспективы развития этого направления связаны с интеграцией методов машинного обучения и высокопроизводительных вычислений в почвенно-климатические модели. Такой подход позволит точнее предсказывать реакции почвенных систем на изменения климата и разрабатывать адаптивные стратегии для сельского хозяйства, учитывающие нелинейную динамику экосистем.

Заключение

В первой части обзора мы рассмотрели ключевые проблемы современного почвоведения, связанные с физико-химической деградацией (эрозия, засоление, переуплотнение), потерей органического вещества и влиянием климатических изменений на внутрипочвенные процессы. Показано, что традиционные подходы к моделированию этих процессов часто сталкиваются с ограничениями из-за высокой нелинейности, многомасштабности и тесной взаимосвязи биотических и

абиотических компонентов. Концепция «жизнь как вычисление» предлагает методологический аппарат, способный объединить эти аспекты в единой формальной рамке.

Интерпретация почвы как распределённой вычислительной среды, где потоки вещества и энергии одновременно выступают носителями информации, способна не только открыть путь к разработке гибридных моделей, сочетающих континуальное описание физических полей (температура, влажность, концентрации) с дискретно-событийными алгоритмами микробной активности, с использованием методов машинного обучения и теории сложных сетей для выявления скрытых закономерностей, но и создавать прогностические системы, способные оценивать риски эрозии, засоления или потери углерода в зависимости от сценариев климатических изменений и антропогенной нагрузки.

Особую значимость приобретает цифровизация почвенных данных и создание высокопроизводительных вычислительных платформ для обработки больших массивов информации, что соответствует приоритетам Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации. Разработка моделей, основанных на вычислительной парадигме, позволит перейти от описательных сценариев к количественному прогнозу и обоснованному выбору адаптивных стратегий землепользования. При этом необходимо учитывать принципиальные ограничения: историческую обусловленность почвенных свойств, локальную специфику и эмерджентность биологических ответов, которые не всегда поддаются полной алгоритмизации. Тем не менее, интеграция концепции «жизнь как вычисление» в арсенал почвоведения открывает путь к созданию эффективных инструментов сохранения и восстановления почвенных ресурсов в условиях глобальных изменений.

Информация о финансировании работы

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности, № FENW-2026–0019.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ**

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ**

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список использованных источников

1. Абдурахманов Г.М., Сокольская Н.И., Брумштейн Ю.М., Сокольский А.Ф. Анализ методов оценки биологического разнообразия // Юг России: экология, развитие. 2013. № 1. С. 97-110.
2. Апарин Б.Ф., Сухачева Е.Ю. Классификация городских почв в системе российской и международной классификации почв // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2015. Вып. 79. С. 53–72.
3. Баранов Д.Ю. Миграция элементов в почвенных водах Валдайской возвышенности // Геохимия. 2022. Т. 67. № 5. С. 482–493. DOI: 10.31857/S0016752522050028.
4. Башкин В.Н. Индустрия 4.0 как стратегия для увеличения эффективности сельского хозяйства // Жизнь Земли. 2024. Т. 46. № 3. С. 298–310. DOI: 10.29003/m4185.0514-7468.2023_46_3/298-310.
5. Безуглова О.С., Тагивердиев С.С., Горбов С.Н. Физические характеристики городских почв Ростовской агломерации // Почвоведение. 2018. № 9. С. 1153–1159.
6. Васильева Г.К., Михедова Е.Е., Стрижакова Е.Р., Ахметов Л.И. Разработка метода сорбционной биоремедиации нефтезагрязненных минеральных почв Северо-Западной Сибири на примере подзола иллювиально-железистого // *Biologia et Biotechnologia*. 2024. Т. 1. № 3. <https://doi.org/10.61847/pbcras.bbt.2024.1.3>.
7. Вайчулис Г.В., Быстрова И.В., Смирнова Т.С. Опустынивание земель южных регионов России. Возможные пути решения проблемы // Научные высказывания. 2021. № 2(2). С. 29–31. URL: <https://nvjournal.ru/article/39-opustinivanie-zemel-yuzhnikh-regionov-rossii-vo>.
8. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Наука, 2004. 265 с.
9. Гаевая Э.А., Безуглова О.С. Прогноз развития процессов деградации на эрозионно-опасных склонах черноземов обыкновенных Ростовской области // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2024. № 2(222). С. 72–83. <https://doi.org/10.18522/1026-2237-2024-2-72-83>.
10. Гаевая Э.А., Безуглова О.С. Нейросетевой прогноз содержания гумуса в черноземах обыкновенных слабоэродированных Ростовской области // АгроЭкоИнфо. 2025. № 2. URL: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2025/2/st_209.pdf. DOI: <https://doi.org/10.51419/202152209>.
11. Горовцов А.В., Иванов Ф.Д., Козьменко С.В., Алешукина И.С. Влияние урбанизации на микробные сообщества почв г. Ростова-на-Дону //

Живые и биокосные системы. 2018. № 26. URL: <https://jbks.ru/archive/issue-26/article-4>. DOI: 10.18522/2308-9709-2018-26-4.

12. Горбов С.Н. Генезис, классификация, экологическая роль городских почв юга европейской части России (на примере Ростовской агломерации): Дис. ... д-ра биол. наук. М.: РГАУ-МСХА, 2018. 357 с.

13. Горбов С.Н., Безуглова О.С. Почвенный покров Ростовской агломерации. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального университета, 2019. 186 с. ISBN 978-5-9275-3218-6.

14. Горбов С.Н., Терехов И. и др. Многолетняя динамика эмиссии углерода в конструкторах под газонами в условиях степной зоны // Почвоведение. 2025. № 5. С. 728–738. DOI: 10.31857/S0032180X25050135.

15. Дергачева М.И. Традиции и новаторство в Учении о гумусе почв // Почвы и окружающая среда. 2021. Т. 4. № 4. С. 1–34. <https://doi.org/10.31251/pos.v4i4.172>.

16. Добровольский Г.В. Педосфера – оболочка жизни планеты Земля // Биосфера. 2010. Т. 1. С. 6–14.

17. Добровольский Г.В., Чернов И.Ю. (ред.) Роль почвы в формировании и сохранении биологического разнообразия. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2011. 273 с.

18. Женченко К.Г., Турин Е.Н., Гонгало А.А. Результаты изучения системы земледелия прямого посева (no-till) при выращивании озимой пшеницы в Центральной степи Крыма // Зерновое хозяйство России. 2020. № 5. С. 45–52. <https://doi.org/10.31367/2079-8725-2020-71-5-45-52>.

19. Заргарян Н.Ю., Кекало А.Ю., Немченко В.В., Ефремов В.П. Влияние агротехнологий на микробиологический состав почвы // Агротехнический вестник. 2022. № 4. С. 34–39.

20. Иващенко В.Г., Павлюшин В.А. Интенсификация растениеводства и эколого-продукционный баланс агроэкосистем: снижение плодородия почв и фитосанитарная дестабилизация // Вестник защиты растений. 2017. № 3(93). С. 5–16.

21. Иващук О.А., Кузичкин О.Р., Гончаров Д.В., Дунаева В.А. Цифровые технологии для оценки и прогнозирования влияния пространственно-временного распределения парниковых газов на фотосинтетическую активность сельскохозяйственных культур // Известия Юго-Западного государственного университета. 2023. Т. 27. № 1. С. 29–44. DOI: 10.21869/2223-1560-2023-27-1-29-44.

22. Кирюшин В.И. Актуальные проблемы и противоречия развития земледелия // Земледелие. 2019. № 3. С. 3–7.

23. Кирюшин В.И. Методология землепользования и землеустройства на ландшафтно-экологической основе. СПб.: Квадро, 2024. 336 с.

24. Ивонин В.М. Регенеративная агролесомелиорация // Региональные Геосистемы. 2024. Т. 48. № 1. С. 30–44. <https://doi.org/10.52575/2712-7443-2024-48-1-30-44>.

25. Итоги Международного года почв: теперь мы будем относиться к почвам более ответственно // FAO. 2015. URL: <https://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/ru/c/356859/>

26. Казеев К.Ш., Мокриков Г.В., Акименко Ю.В. и др. Влияние технологии No-till на экологическое состояние черноземов южных Ростовской области // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34. № 1. С. 7–11. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10101>.

27. Канатьева Н.П., Краснов С.Ф., Литвин Л.Ф. Современные изменения климатических факторов эрозии в Северном Приволжье // Эрозия почв и русловые процессы. М.: МГУ, 2010. Вып. 17. С. 14–27.

28. Кожевин П.А. Показатели почвенного «здоровья» в оценке почв (обзор) // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2023. Т. 78. № 2. С. 16–25.

29. Коковихин С.В., Василько В.П., Сташкина А.Ф. Оптимизация систем земледелия на территории Северного Причерноморья в условиях изменения климата и эколого-мелиоративного состояния почв // Известия сельскохозяйственной науки Тавриды. 2023. № 36(199). С. 20–26.

30. Комаров А.А., Безуглова О.С. Гумусообразование как процесс трансформации растительных остатков // Почвы и окружающая среда. 2025. Т. 8. № 1. e307. <https://doi.org/10.31251/pos.v8i1.307>.

31. Коновалов А.Г., Рисник Д.В., Левич А.П., Фурсова П.В. Обзор подходов к оценке экологического состояния и нормированию качества почв // Биосфера. 2017. Т. 9. № 3. С. 214–229. <https://doi.org/10.24855/biosfera.v9i3.371>.

32. Кононова А.О. Роль зелёных насаждений и парков в поддержании устойчивости почв // Проблемы и состояние почв городских и лесных экосистем: материалы III научно-практической конференции / Под ред. Б.В. Бабикова и др. СПб.: СПбГЛТУ, 2024. С. 49–52.

33. Костина Л.В., Куюкина М.С., Ившина И.Б. Методы очистки загрязненных тяжелыми металлами почв с использованием (био)сурфактантов (обзор) // Вестник Пермского университета. 2009. Вып. 10(36). С. 95–110.

34. Кудеяров В.Н. Секвестрация углерода в почве: факты и проблемы (аналитический обзор) // Успехи современной биологии. 2022. Т. 142. № 6. С. 545–559.

35. Кудеяров В.Н. Почвенное дыхание и секвестрация углерода (обзор) // Почвоведение. 2023. № 9. С. 1011–1022. DOI: 10.31857/S0032180X23990017.

36. Кулик К.Н., Беляев А.И., Пугачёва А.М. Роль защитного лесоразведения в борьбе с засухой и опустыниванием агроландшафтов // Аридные экосистемы. 2023. Том 29, № 1(94). С. 4–14.

37. Лебедева О.С., Николаев И.А. Рекультивация засоленных почв в местах древней добычи соли // Почвоведение. 2020. № 3. С. 29–36.

38. Морозов А.И. О почве и почвоведении (взгляд со стороны). М.: Геос, 2007. 286 с.

39. Муромцев Н.А., Семенов Н.А., Мажайский Ю.А., Анисимов К.Б. Закономерности накопления, потерь и возврата влаги и химических веществ при внутрипочвенном влагообмене // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2014. Вып. 76. С. 111–125.

40. Неведров Н.П., Проценко Е.П., Косолапова Н.И. и др. Краткосрочная динамика протекторной функции загрязненного свинцом модельного конструктора // Экология урбанизированных территорий. 2024. № 3. С. 48–52. DOI: 10.24412/1816-1863-2024-3-48-53.

41. Новикова Н.М., Назаренко О.Г. Современный гидроморфизм: процессы, формы проявления, признаки в экосистемах // Аридные экосистемы. 2007. Т. 13. № 33–34. С. 68–80.

42. 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. <https://doi.org/10.15393/j1.art.2024.14964>.

43. Панкова Т.И., Масютенко Н.П., Колтышева Е.В. Возможности моделирования плодородия почв на основе информационно-логического анализа // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 4. С. 8–15.

44. Пересмотренная Всемирная хартия почв / Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (ФАО). 2022. URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/346a016f-8c54-4798-be83-806d116606d3/content> (дата обращения: 04.03.2026).

45. Полиенко Е.А., Наими О.И., Безуглова О.С. Влияние гуминового препарата ВЮ-Дон на состав и динамику питательных элементов в системе «почва – растение» // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. №5 (67). 2017. С.192–195. http://orensau.ru/images/stories/docs/izvestia/2017/12/Izvestia_5_67.pdf

46. Прокофьева Т.В., Герасимова М.И., Безуглова О.С. и др. Введение почв и почвоподобных образований городских территорий в классификацию почв России // Почвоведение. 2014. № 10. С. 1155–1164.

47. Прокофьева Т.В., Герасимова М.И. Городские почвы: диагностика и классификационное определение по материалам научной экскурсии конференции SUITMA-9 по Москве // Почвоведение. 2018. № 9. С. 1057–1070.

48. Прохоров И.С. Мониторинг состояния почв города Москвы и предложения по их рекультивации // Почвоведение и агрохимия. 2015. № 1. С. 61–68.

49. Росликова В.И. Трансформация почв в урбанизированных ландшафтах города Хабаровска под влиянием гидрологических процессов // Живые и биокосные системы. 2017. № 20. URL: <https://jbks.ru/archive/issue-20/article-1>. DOI: 10.18522/2308-9709-2017-20-1.

50. Руководство по управлению засоленными почвами / Под ред. Р. Варгаса, С.А. Балюка, П.В. Красильникова, Г.М. Хасанхановой. Рим: FAO, 2017. 152 с. URL: <https://www.researchgate.net/publication/325050045>.

51. Рухович Д.И., Королева П.В., Калинина Н.В. и др. Детектирование деградированных участков пашни на основе анализа больших спутниковых данных // Почвоведение. 2021. № 2. С. 151–167. DOI: 10.31857/S0032180X21020131.

52. Рязанова А.А., Богомоллов В.Ю., Медведев А.И. Применимость различных педострансферных функций к описанию гидрофизических характеристик почв (грунтов) // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 5. С. 585–601.

53. Савченко Е.С., Лукин С.В. Управление режимом органического вещества почвы при биологизации земледелия // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2024. № 6. С. 61–65. DOI: 10.31857/S2500208224060147.

54. Свецкий А.В. Применение искусственного интеллекта в сельском хозяйстве // Сельское хозяйство. 2022. № 3. С. 1–12. DOI: 10.7256/2453-8809.2022.3.39469.

55. Семизоров С.А., Абрамов Н.В., Топорков И.Н. Системные цифровые решения в развитии точного земледелия // Вестник Курганской ГСХА. 2024. № 3(51). С. 28-36.

56. Скворцов Е.А., Ялунина Е.Н., Скворцова Е.Г. Области применения систем искусственного интеллекта в сельском хозяйстве // Russian Journal of Management. 2023. Т. 11. № 2. С. 122–134. DOI: 10.29039/2409-6024-2023-11-2-122-134.

57. Скорыходов В.Ю. Изменение плодородия почвы и продуктивность монокультур при длительном применении удобрений // Известия НВ АУК. 2022. № 1(65). С. 153–161. DOI: 10.32786/2071-9485-2022-01-14.

58. Соболев Н.В. Развитие эрозионных процессов в изменяющихся климатических условиях Южно-Уральского региона: Дис. ... канд. биол. наук. Уфа: Башкирский ГАУ, 2016. 150 с.

59. Соколов М.С. В.И. Вернадский и его биосферология // Биосфера. 2013. Т. 5. № 1. С. 9–20.

60. Стулин А.Ф., Верховцева Н.В., Милановский Е.Ю., Амелянчик О.А. Агроэкологическая оценка длительного применения минеральных удобрений в агроценозах кукурузы (*Zea mays* L.) в условиях Центрального Черноземья // Проблемы агрохимии и экологии. 2020. № 2. С. 3–10.

61. Суховеева О.Э. Моделирование потоков парниковых газов и циклов азота и углерода в почвах (обзор) // Журнал естественнонаучных исследований. 2017. Т. 2. № 4. С. 61–76.

62. Суховеева О.Э. Адаптация землепользования к изменениям климата в России // Метеорология и гидрология. 2020. № 12. С. 20–26.

63. Суяндукоев Я.Т., Суяндукоева М.Б., Безуглова О.С. и др. Физические свойства почв города Сибай Республики Башкортостан // Почвоведение. 2022. № 1. С. 33–43. DOI: 10.31857/S0032180X22010129.

64. Сычев В.Г., Налиухин А.Н., Шевцова Л.К. и др. Влияние систем удобрения на содержание почвенного органического углерода и урожайность сельскохозяйственных культур: результаты длительных полевых опытов Географической сети России // Почвоведение. 2020. № 12. С. 1521–1536. <https://doi.org/10.31857/S0032180X20120138>.

65. Тарасов А.С., Тарасов С.А. Методологические основы концепции воспроизводства плодородия почв // Экономика и экология территориальных образований. 2021. Т. 5. № 3. С. 38–46. <https://doi.org/10.23947/2413-1474-2021-5-3-38-46>.

66. Теймуров С.А., Казиев М.-Р.А., Багомаев А.А. Региональные адаптационные меры по минимизации климатических рисков в сельском хозяйстве // Юг России: экология, развитие.

67. 2024. Т. 19, N 4. С. 178–190. DOI: 10.18470/1992-1098-2024-4-15

68. Терехова В.А., Кулачкова С.А., Морачевская Е.В., Кирюшина А.П. Методология биодиагностики почв и особенности некоторых методов биоиндикации и биотестирования (обзор) // Вестник Московского университета. Серия 17. Почвоведение. 2023. Т. 78. № 2. С. 35–45. <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-2-35-45>.

69. Федоров Ю.А., Сухоруков В.В., Трубник Р.Г. Аналитический обзор: эмиссия и поглощение парниковых газов почвами. Экологические проблемы // Антропогенная трансформация природной среды. 2021. Т. 7. № 1. С. 6–34. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-6-34>.

70. Федосов А.Ю., Меньших А.М., Фартуков В.А. и др. Применение искусственного интеллекта при оптимизации орошения и применении гербицидов // Экономика строительства. 2023. № 2. С. 42–51.

71. Чевердин Ю.И., Титова Т.В. Гидроморфные почвы Каменной Степи. Воронеж: Истоки, 2020. 253 с.

72. Чернов Т.И., Семенов М.В. Управление почвенными микробными сообществами: возможности и перспективы (обзор) // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1506–1522. DOI: 10.31857/S0032180X2112002.

73. Чурсин А.И., Незванова К.В. Методы борьбы с деградацией почв в РФ // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 6–1. С. 88–91. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=9557>.

74. Чистяков В. А., Денисенко Ю. В., Колесникова А. М., Поротникова А. В., Брень А. Б. Концепция «Жизнь как вычисление» и разработка новых противоопухолевых технологий // «Живые и биокосные системы». – 2025. – № 51; URL: <https://jbks.ru/archive/issue-51/article-18>; DOI: 10.18522/2308-9709-2025-51-18

75. Шеин Е.В., Скворцова Е.Б., Панина С.С. и др. Гидродепозитарные и гидропроводящие свойства при моделировании влагопереноса в дерново-подзолистых почвах с помощью физически обоснованных моделей // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2015. Вып. 80. С. 71–82.

76. Шоба С.А., Алябина И.О., Голозубов О.М. и др. Опыт создания информационной системы в целях рационального использования почвенных ресурсов // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2023. № 4. С. 14–28. DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-4-14-28.

77. Щедрин В.Н., Коржов В.И., Кожанов А.Л., Черемисова В.Б. Моделирование водного режима почв на полях мелиоративных систем двойного регулирования // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12. № 1. С. 1–17. <https://doi.org/10.31774/2712-9357-2022-12-1-1-17>.

78. Якушев В.П., Якушев В.В., Блохина С.Ю. и др. Информационное обеспечение современных систем земледелия в России // Вестник РАН. 2021. Т. 91. № 8. С. 755–768. DOI: 10.31857/S0869587321080090.

79. Aguilar-Garrido A., Purswani J., Romero-Freire A. et al. Enhancing microbial biodiversity and vegetation growth in polluted soils by constructed Technosols // Pedosphere. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2025.05.007>.

80. Bahram M., Hildebrand F., Forslund S.K. et al. Structure and function of the global topsoil microbiome // *Nature*. 2018. Vol. 560(7717). P. 233-237. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0386-6>.

81. Balestrini V.P., Pinto O.H.B., Simmons B.A. et al. Analysis of novel bacterial metagenome-assembled genomes from lignin-degrading microbial consortia // *Current Research in Microbial Sciences*. 2024. Vol. 7. P. 100302. <https://doi.org/10.1016/j.crmicr.2024.100302>.

82. Belhaj F., Hlila R., Belkendil A., Ouallali A., Beroho M., Alfagham A.T., Aqil T. Monitoring and forecasting water erosion in response to climate change effects using the integration of the global RUSLE/SDR model and predictive models // *Applied Soil Ecology*. 2025. Vol. 206. P. 105910. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.105910>.

83. Ben-Jacob E., Cohen I., Levine H. Cooperative self-organization of microorganisms // *Advances in Physics*. 2000. Vol. 49. P. 395-554. <https://doi.org/10.1080/000187300405228>.

84. Blakemore R.J. Biodiversity restated: > 99.9% of global species in Soil Biota // *ZooKeys*. 2025. Vol. 1224. P. 283–316. <https://doi.org/10.3897/zookeys.1224.131153>.

85. Bonan G.B., Doney S.C. Climate, ecosystems, and planetary futures: The challenge to predict life in Earth system models // *Science*. 2018. Vol. 359(6375). P. eaam8328. <https://doi.org/10.1126/science.aam8328>.

86. Enebe M.C., Ray R.L., Griffin R.W. Carbon sequestration and soil responses to soil amendments - A review // *Journal of Hazardous Materials Advances*. 2025. Vol. 18. P. 100714. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2025.100714>.

87. Gholami V., Sahour H., Hadian Amri M.A. Soil erosion modeling using erosion pins and artificial neural networks // *Catena*. 2021. Vol. 196. P. 104902. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104902>.

88. Gomes, C.P. Computational Sustainability: Computational methods for a sustainable environment, economy, and society // *Bridge on Frontiers of Engineering*. Vol 39. No. 4 (Winter 2009). P. 5–13.

89. Gorzelak MA, Asay AK, Pickles BJ, Simard SW. 2015. Inter-plant communication through mycorrhizal networks mediates complex adaptive behaviour in plant communities. *AoB PLANTS* 7: plv050; doi:10.1093/aobpla/plv050

90. Horn R., Mordhorst A., Fleige H. The impact of arable soil management on physical functions – The ratio of air capacity and air permeability or hydraulic conductivity as a document of harmful soil compaction // *Soil and Tillage Research*. 2024. Vol. 244. P. 106221. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106221>.

91. Husaini A.M., Sohail M. Agrochemical-free genetically modified and genome-edited crops: Towards achieving the United Nations sustainable development goals and a 'greener' green revolution // *Journal of Biotechnology*. 2024. Vol. 389. P. 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2024.04.015>.

92. Isola F., Lai S., Leone F., Zoppi C. Urban Green Infrastructure and Ecosystem Service Supply: A Study Concerning the Functional Urban Area of Cagliari, Italy // *Sustainability*. 2024. Vol. 16. P. 8628. <https://doi.org/10.3390/su16198628>.

93. Jamil A., Gharibi S., Rastkhadiv A. Prediction of soil erosion control ecosystem service using machine learning based on the ANN model in Asia // *Environmental and Sustainability Indicators*. 2025. Vol. 26. P. 100723. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100723>.

94. Jiang W., Lin Z., Qin Z. et al. Climate-management interactions drive soil organic carbon sequestration potential in China's croplands during 2020-2060 // *Soil & Environmental Health*. 2025. Vol. 3. № 3. P. 100159. <https://doi.org/10.1016/j.seh.2025.100159>.

95. Kama R., He J., Nabi F. et al. Crop rotation and green manure type enhance organic carbon fractions and reduce soil arsenic content // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2025. Vol. 378. P. 109287. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109287>.

96. Koza M., Schmidt G., Bondarovich A. et al. Consequences of chemical pretreatments in particle size analysis for modelling wind erosion // *Geoderma*. 2021. Vol. 396. P. 115073. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115073>.

97. Kulik K.N., Vlasenko M.V. Experience in implementing major national projects to combat degradation and desertification in Russia // *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2024. Vol. 9. P. 100583. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100583>.

98. Kurashvili M.V., Adamia G.S., Amiranashvili L.L. et al. Targeting of detoxification potential of microorganisms and plants for cleaning environment polluted by organochlorine pesticides // *Annals of Agrarian Science*. 2016. Vol. 14. № 3. P. 222–226. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2016.07.007>.

99. Liang C. et al. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage // *Nature*. 2017. Vol. 552(7684). P. 194-198. DOI: 10.1038/nature24642.

100. Liebhard G., Toth M., Stumpp C., Bodner G., Klik A., Zhang X., Strohmeier S., Strauss P. Developing topsoil structure through conservation management to protect subsoil from compaction // *Soil and Tillage Research*. 2025. Vol. 253. P. 106669. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106669>.

101. Liu J., Qi X., Ma Ch., Wang Zh., Li H. Response of Sheet Erosion to the Characteristics of Physical Soil Crusts for Loessial Soils// *Front. Environ. Sci.* 2022. Vol. a10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.905045>
102. Lloyd S. *Programming the Universe: A Quantum Computer Scientist Takes on the Cosmos*, Knopf Doubleday Publishing Group, 2006. 240 p. ISBN 1-4000-4092-2
103. Lv P., Liu Y., Jia X. et al. Enhancing soil health in urban green spaces: The critical role of terrain and hydrological connectivity in nutrient redistribution // *CATENA*. 2025. Vol. 258. P. 109239. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109239>.
104. Mendes R. et al. Deciphering the rhizosphere microbiome for disease-suppressive bacteria // *Science*. 2011. Vol. 332(6033). P. 1097-1100. DOI: 10.1126/science.1203980.
105. Mohammed S. Modeling current and future run-off and soil erosion dynamics in Eastern Mediterranean ecosystems using the WEPP model // *Energy Nexus*. 2025. Vol. 17. P. 100375. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2025.100375>.
106. Musasa T., Shoko C., Marambanyika T., Dube T. Modelling soil erosion risk in rural sub-catchments of Zimbabwe using RUSLE, remote sensing and machine learning // *Journal of Arid Environments*. 2025. Vol. 229. P. 105407. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2025.105407>.
107. Nikiforova A.A. The problem of global soil data integration and its possible solution // *CATENA*. 2024. Vol. 244. P. 108222. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108222>.
108. Nissim W.G., Labrecque M. Reclamation of urban brownfields through phytoremediation: Implications for building sustainable and resilient towns // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2021. Vol. 65. P. 127364. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127364>.
109. Noble D. *The Music of Life: Biology Beyond the Genome*. Oxford University Press, 2006. 153 p.
110. Norris, V., Zemirline, A., Amar, P., Audinot, J. N., Ballet, P., Ben-Jacob, E., Bernot, G., Beslon, G., Cabin, A., Fanchon, E., Giavitto, J. L., Glade, N., Greussay, P., Grondin, Y., Foster, J. A., Hutzler, G., Jost, J., Kepes, F., Michel, O., Molina, F., ... Thierry, A. R. Computing with bacterial constituents, cells and populations: from bioputing to bactoputing. *Theory in biosciences = Theorie in den Biowissenschaften*. 2011.130(3), 211–228. <https://doi.org/10.1007/s12064-010-0118-4>

111. Nunes F. et al. Soil as a complex ecological system for meeting food and nutritional security // *Sustainable Food Systems*. 2020. DOI: 10.1016/B978-0-12-818032-7.00009-6.
112. Oishy M.N., Shemonty N.A., Fatema S.I. et al. Unravelling the effects of climate change on the soil-plant-atmosphere interactions: A critical review // *Soil & Environmental Health*. 2025. Vol. 3. № 1. P. 100130. <https://doi.org/10.1016/j.seh.2025.100130>.
113. Olayiwola V.A., Mesele S.A., Ajayi E.O. Towards a clean environment: To what extent can trees serve as phytoremediators for chemically polluted soils? // *Environmental Challenges*. 2023. Vol. 13. P. 100764. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100764>.
114. Parvin N., Sayeed K.M.A., Jaman M.S. et al. Plant diversity enhances soil organic carbon content in mixed stands more than single stands in the urban vegetation of Dhaka, Bangladesh // *Ecological Frontiers*. 2025. Vol. 45. № 2. P. 316-327. <https://doi.org/10.1016/j.ecofro.2024.10.001>.
115. Reichstein M. et al. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science // *Nature*. 2019. Vol. 566(7743). P. 195-204. DOI: 10.1038/s41586-019-0912-1.
116. Reidsma P., Accatino F., Appel F. et al. Alternative systems and strategies to improve future sustainability and resilience of farming systems across Europe: from adaptation to transformation // *Land Use Policy*. 2023. Vol. 134. P. 106881. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106881>.
117. Romanenkov V.A., Meshalkina Y.L., Gorbacheva A.Y. et al. Forecasting the Carbon Stock Dynamics in the Soils of Cultivated Croplands in European Russia in the Context of the Low-Carbon Development // *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. 2023. Vol. 87. № 4. P. 584-596.
118. Russell D.J., Naudts E., Soudzilovskaia N.A. et al. Edaphobase 2.0: Advanced international data warehouse for collating and using soil biodiversity datasets // *Applied Soil Ecology*. 2024. Vol. 204. P. 105710. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105710>.
119. Sá de Moraes J.C., Lal R., Lorenz K. et al. No-till systems restore soil organic carbon stock in Brazilian biomes and contribute to the climate solution // *Science of The Total Environment*. 2025. Vol. 977. P. 179370. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179370>.
120. Sawant S.B., Mitra D., Raju R.S. et al. Microbiome: What if the next green revolution is microbial? // *Physiological and Molecular Plant Pathology*. 2025. Vol. 139. P. 102789. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2025.102789>.

121. Schäffer B., Attinger W., Schulin R. Compaction of restored soil by heavy agricultural machinery—Soil physical and mechanical aspects // *Soil and Tillage Research*. 2007. Vol. 93. № 1. P. 28-43. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.03.007>.

122. Schimel J.P., Schaeffer S.M. Microbial control over carbon cycling in soil // *Nature Geoscience*. 2012. Vol. 5(8). P. 535-544. DOI: 10.1038/ngeo2520.

123. Senanayake S., Pradhan B., Alamri A., Park H.-J. A new application of deep neural network (LSTM) and RUSLE models in soil erosion prediction // *Science of The Total Environment*. 2022. Vol. 845. P. 157220. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157220>.

124. Senthil G.A., Suganthi S.U., Prinslin L. et al. Generative AI in Agri: Sustainability in Smart Precision Farming Yield Prediction Mapping System Based on GIS Using Deep Learning and GPS// *Procedia Computer Science*. 2025. Vol. 252. P. 365-380. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.12.038>.

125. Sheng, Y., Zhang, S., Li, L., Cao, Z., Zhang, Yu. (2025). Simulation of slope soil erosion intensity with different vegetation patterns based on cellular automata model. *Frontiers in Environmental Science*. 12. 10.3389/fenvs.2024.1512973.

126. Simard S., Perry D., Jones M. et al. Net transfer of carbon between ectomycorrhizal tree species in the field // *Nature*. 1997. Vol. 388. P. 579-582. DOI: 10.1038/41557.

127. Sondag D.A., Gaudin A.C.M., Mitchell J.P. et al. Priming the decomposition of cover crop residues in no-till organic cropping systems // *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2025. Vol. 388. P. 109651. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109651>.

128. Targulian V.O., Krasilnikov P.V. Soil System and Pedogenic Processes: Self-organization, Time Scales and Environmental Significance, *CATENA*, 2007, vol 71, iss. 3. p. 15—28

129. Tian S., Xia Y., Yu Z. et al. Improvement and the relationship between chemical properties and microbial communities in secondary salinization of soils induced by rotating vegetables // *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 921. P. 171019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171019>.

130. Tóth G., Stolbovoy V., Montanarella L. Soil Quality and Sustainability Evaluation - An Integrated Approach to Support Soil-Related Policies of the European Union. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2007. 56 p.

131. Tsiafouli M.A., Thébault E., Sgardelis S.P. et al. Intensive agriculture reduces soil biodiversity across Europe // *Global Change Biology*. 2015. Vol. 21. № 2. P. 973-985. <https://doi.org/10.1111/gcb.12752>.
132. Turrini A., Sbrana C., Giovannetti M. Belowground environmental effects of transgenic crops: a soil microbial perspective // *Research in Microbiology*. 2015. Vol. 166. № 3. P. 121-131. <https://doi.org/10.1016/j.resmic.2015.02.006>.
133. Voulanas D., Hatzigiannakis E., Arampatzis G. HYDRUS-1D modelling of soil water regime in a rational irrigation pilot application (Nigrita, Greece) // *Desalination and Water Treatment*. 2022. Vol. 264. P. 307-317. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28584>.
134. Wadoux A. Artificial intelligence in soil science // *European Journal of Soil Science*. 2025. Vol. 76. e70080. DOI: 10.1111/ejss.70080.
135. Wang B., Chen C., Xiao Y.-M. et al. Trophic relationships between protists and bacteria and fungi drive the biogeography of rhizosphere soil microbial community and impact plant physiological and ecological functions // *Microbiological Research*. 2024. Vol. 280. P. 127603. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2024.127603>.
136. Wang R., Qin H., Shi Z. et al. Enhanced microbial network stability and biogeochemical cycles in saline-alkali soil through simplified prokaryotes and complex fungal networks // *Applied Soil Ecology*. 2025. Vol. 213. P. 106245. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106245>.
137. Wang M., Zhang S., Wang G. et al. Increased plant productivity exacerbates subsoil carbon losses under warming via nitrogen mining // *Nature Geoscience*. 2025. P. 1-8. DOI: 10.1038/s41561-025-01697-1.
138. Wang Z, Xia S, Bolan N, et al. Elevated salinity decreases soil multifunctionality by driving bacterial community structure and network complexity. *Sci Total Environ*. 2025;1000:180362. doi:10.1016/j.scitotenv.2025.180362
139. Wieder W.R. et al. Explicitly representing soil microbial processes in Earth system models // *Nature Climate Change*. 2015. Vol. 5(9). P. 852-859. DOI: 10.1038/nclimate2581.
140. Wieder W.R., Hartman M.D., Sulman B.N. et al. Carbon cycle confidence and uncertainty: exploring variation among soil biogeochemical models // *Global Change Biology*. 2018. Vol. 24. P. 1563-1579. DOI: 10.1111/gcb.13979.
141. Williams G., Miller R., Deng S. Dynamic relationships between microbial community, enzyme activity, and soil properties across global

ecosystems // *Applied Soil Ecology*. 2025. Vol. 206. P. 105843. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105843>.

142. Wu Z., Kang L., Man Q. et al. Synergistic surfactant cleaning-bioaugmentation strategy enables deep remediation of heavily petroleum-contaminated soils: Field validation and microbial mechanism // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2025. Vol. 201. P. 106079. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2025a.106079>.

143. Wu J., Zhou B., Li Z. et al. Biochar promoted soil organic carbon accumulation and aggregate stability by increasing the content of organic complex metal oxides in paddy soil // *Soil and Tillage Research*. 2025b. Vol. 254. P. 106713. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106713>.

144. Xiao Y., Hu W., Zhang Y. et al. Spatiotemporal variation and driving forces of soil salinization in the lower reach of arid endorheic basins: Critical role of lake system and groundwater overflow // *Agricultural Water Management*. 2025. Vol. 315. P. 109568. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109568>.

145. Xing K., Lu W., Huang Q. et al. Soil eDNA biomonitoring reveals changes in multitrophic biodiversity and ecological health of agroecosystems // *Environmental Research*. 2024. Vol. 262 (Part 2). P. 119931. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.119931>.

146. Xu H., Fan J., Tao F. et al. Biogeochemistry-Informed Neural Network (BINN) for Improving Accuracy of Model Prediction and Scientific Understanding of Soil Organic Carbon // *arXiv*. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2502.00672.

147. Xue T., Zhang L., Yang F. et al. Carbon sink and soil organic carbon sequestration mechanisms in vineyards // *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 469. P. 143217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143217>.

148. Yan K., Mei X., Zhang C. et al. Short-term emissions effect of rainfall erosion on soil CO₂ in red soil sloped farmland in southern China // *Soil and Tillage Research*. 2025. Vol. 252. P. 106627. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106627>.

149. Yang C., Yang L., Zhang L. et al. Applicability of three remote sensing-based soil moisture variables for mapping soil organic matter in areas with different vegetation densities // *Journal of Hydrology*. 2025. Vol. 655. P. 132980. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132980>.

150. Yao X., Guo H., Li D. et al. Novel approaches for alleviating shallow soil compaction using microbial fertilizers and their beneficial impacts on plant growth and soil physicochemical properties // *Soil and Tillage Research*. 2025. Vol. 247. P. 106380. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106380>.

151. Zenil, Hector. A Computable Universe: Understanding and Exploring Nature as Computation. Singapore: World Scientific, 2013. - 810 p. ISBN 978-981-4374-29-3.

152. Zhang J., Zhang J., Yang L. A long-term effect of Larix monocultures on soil physicochemical properties and microbes in northeast China // European Journal of Soil Biology. 2020. Vol. 96. P. 103149. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2019.103149>.

153. Zhao J., Cai L., Zhang A. et al. Simultaneous remediation of diesel-polluted soil and promoted ryegrass growth by non-thermal plasma pretreatment // Science of The Total Environment. 2024. Vol. 912. P. 169295. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169295>.

154. Zhao X, Chen Y, Hu J, et al. Efficacy of nitrate and biochar@birnessite composite microspheres for simultaneous suppression of As(III) mobilization and greenhouse gas emissions in flooded paddy soils. Environ Res. 2025;279(Pt 1):121757. doi:10.1016/j.envres.2025.121757

155. Zheng Y, Abbott LK, Bolan N, Singh PK, Jenkins SN, Mickan BS. Evaluating the potential of digestate-loaded biochar in improving soil biological health and plant nutrition with less greenhouse gas emissions. Environ Pollut. 2025;377:126431. doi:10.1016/j.envpol.2025.126431

156. Zhou J., Luo Y., Chen J. Dilemmas in Linking Microbial Carbon Use Efficiency with Soil Organic Carbon Dynamics // Global Change Biology. 2025. Vol. 31. DOI: 10.1111/gcb.70047.

THE CONCEPT OF "LIFE AS COMPUTATION" IN THE SYSTEM ANALYSIS OF SOIL PROCESSES (REVIEW). PART 1.

V.A. Chistyakov^{1,2,3}, S.N. Gorbov^{1,4}, A.B. Bren^{2*}, T.V. Varduny¹, M.Yu. Odabashyan²,
O.S. Bezuglova¹

¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

²Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

³Peter the Great Polytechnic University (SPbPU), Saint Petersburg, Russia

⁴Sirius University of Science and Technology, Sirius Federal Territory, Russia

⁵Federal Rostov Agrarian Scientific Center

brenanzhelika@yandex.ru*

Abstract

A promising analytical review, the purpose of which is to substantiate the possibility of applying a new interdisciplinary approach based on the concept of "life as computation" to study the complex dynamics of soil processes. *The first* part of the review examines the potential of applying the metaphor and methodological framework of the concept of "life as computation" to the fundamental problems of modern soil science related to abiotic soil degradation, organic matter dynamics and the impact of climate change. Based on the analysis of current sources, modern challenges are systematized, including erosion, salinization, over-compaction, dehumidification and transformation of the water-thermal regime of soils. Based on an integrative analysis combining the methods of theoretical biology, bioinformatics and information theory, it is shown that an approach is applicable to soil that interprets it as a computer network where biological and chemical processes represent algorithmic interactions. *This opens* up opportunities for developing more accurate predictive models. *These models* can be used to optimize agricultural practices and manage soil resources.

Keywords

Soil science, soil degradation, organic carbon, climate change, erosion, computational paradigm, system analysis, pedogenesis

Статья поступила в редакцию 8 февраля 2026 г.

Поступила после доработки 18 февраля 2026 г.

Принята к печати 12 марта 2026 г.

Received 8, February, 2026

Revised 18, February, 2026

Accepted 12, March, 2026