

УДК 005:631.4

DOI: 10.18522/2308-9709-2026-55-22

КОНЦЕПЦИЯ «ЖИЗНЬ КАК ВЫЧИСЛЕНИЕ» В СИСТЕМНОМ АНАЛИЗЕ ПОЧВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ (ОБЗОР). ЧАСТЬ 2

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;

brenanzhelika@yandex.ru*

Аннотация

Продолжение аналитического обзора, посвященного обоснованию возможности применения и ограничениям концепции «жизнь как вычисление» применительно к системному анализу ключевых почвенных процессов и решению актуальных проблем современного почвоведения. Вторая часть обзора посвящена анализу применимости концепции «жизнь как вычисление» к исследовательским задачам, лежащим на стыке почвенной биологии, антропогенной трансформации и методов обработки больших данных. Объектом анализа выступают проблемы сохранения биоразнообразия, функционирования урбанизированных почв, оптимизации землепользования и современного мониторинга (ГИС, дистанционное зондирование, ИИ). Показано, что почвенное микробное сообщество может рассматриваться как распределенная сетевая структура, реализующая принципы «биокомпьютации» через метаболические пути и горизонтальный перенос генов. Особое внимание уделено роли ризосферных взаимодействий как каналов информационного обмена в системе «почва-растение». Обсуждается, как методы искусственного интеллекта и машинного обучения, применяемые для классификации почв (включая городские) и прогнозирования их свойств, фактически являются «мета-уровнем» анализа вычислительных способностей педосферы. Показано, что концепция «жизнь как вычисление» открывает новые перспективы для системного анализа и моделирования почвенных процессов, однако её применение требует учёта эмерджентных свойств биологических систем; в целом, интеграция этой концепции в почвоведение способствует формированию новой методологической базы, отвечающей вызовам антропоцена.

Ключевые слова

«Жизнь как вычисление», биоразнообразии почв, урбаноземы, цифровое почвоведение, искусственный интеллект, почвенно-экологические взаимодействия, устойчивое сельское хозяйство, диагностика, мониторинг.

Введение

Современное почвоведение переживает методологическую трансформацию, расширяя свои границы от преимущественно агрономических задач до роли интегрирующей науки о Земле, изучающей педосферу как динамическую оболочку, обеспечивающую функционирование биосферы (Добровольский, 2010; Targulian, Krasilnikov, 2008). Почва не только служит средой обитания для огромного разнообразия организмов, но и выступает ключевым звеном в глобальных биогеохимических циклах, регулировании климата, создании и поддержании биоразнообразия. Однако растущая антропогенная нагрузка – урбанизация, интенсификация сельского хозяйства, загрязнение – ведёт к трансформации почвенного покрова, утрате его экологических функций и снижению устойчивости. Особое значение приобретают исследования биоразнообразия почв, механизмов взаимодействия в системе «почва–растения–микроорганизмы», а также разработка методов диагностики, мониторинга и цифрового моделирования почвенных процессов.

В условиях экспоненциального роста объёмов данных, получаемых с помощью дистанционного зондирования, сенсорных сетей и лабораторных анализов, возникает необходимость в новых концептуальных рамках, способных интегрировать гетерогенную информацию и выявлять скрытые закономерности. Одной из таких рамок является междисциплинарная концепция «жизнь как вычисление» (life-as-computation), которая предлагает рассматривать биологические и экологические системы через призму информационных потоков, алгоритмических взаимодействий и сетевой динамики (Lloyd, 2006; Zenil, 2012). Применительно к почвоведению это означает интерпретацию почвенной биоты (микробных сообществ, микоризных сетей, почвенной мезофауны) как распределённых вычислительных ансамблей, обрабатывающих сигналы окружающей среды и принимающих «решения» о метаболической активности, симбиотических связях или горизонтальном переносе генов.

Особый интерес представляет анализ городских почв как специфических антропогенно-преобразованных систем, где естественные и техногенные компоненты образуют новые вычислительные архитектуры. Здесь концепция

«жизнь как вычисление» может помочь формализовать процессы самоорганизации и адаптации почвенной биоты к экстремальным условиям, а также оценить потенциал городских почв для выполнения экосистемных услуг. Кроме того, цифровые методы – искусственный интеллект, ГИС-технологии, базы данных – становятся не просто инструментами, а «мета-уровнем» анализа, позволяющим реконструировать алгоритмы, реализуемые почвенной системой.

Цель второй части обзора – обобщить современные исследования, демонстрирующие возможности применения концепции «жизнь как вычисление» к проблемам почвенного биоразнообразия, антропогенной трансформации (особенно урбанизации) и цифрового мониторинга. Рассматриваются как теоретические аналогии (почвенная биота как нейросеть, микориза как интернет растений), так и конкретные примеры использования вычислительных методов для прогноза состояния почв и оптимизации землепользования.

Биоразнообразие почв и его роль в функционировании экосистем

Почвенный микробиом функционирует как высокоорганизованная вычислительная сеть, где взаимодействие между микроорганизмами напоминает распределённые алгоритмы, обеспечивающие устойчивость. Метагеномные исследования, такие как глобальный анализ почвенных сообществ (Bahram et al., 2018), показывают, что микробы формируют саморегулирующиеся сети, способные адаптироваться к изменениям среды и подавлять фитопатогены за счёт коллективных взаимодействий. Эти свойства можно использовать для прогнозирования динамики почвенных экосистем, например, моделируя реакции микробных сообществ на климатические изменения или антропогенное воздействие. Подобные прогнозы позволят разрабатывать превентивные стратегии сохранения биоразнообразия, такие как целевая интродукция ключевых видов-регуляторов или оптимизация сельскохозяйственных практик для поддержания баланса микробиома.

Одним из ключевых приложений этого подхода является борьба с фитопатогенами. Исследования демонстрируют, что устойчивые почвенные сообщества естественным образом подавляют патогенные микроорганизмы за счёт конкуренции за ресурсы и синтеза антимикробных соединений (Mendes et al., 2011). Например, введение определённых штаммов *Pseudomonas* и *Bacillus* в агроценозы снижает заболеваемость растений без применения химических фунгицидов. Более того, анализ «коллективного интеллекта» микробиома позволяет идентифицировать новые биоконтрольные агенты. Так, исследование

(Fierer et al., 2012) выявило корреляцию между разнообразием почвенных бактерий и устойчивостью экосистемы к инвазивным патогенам.

Исследования показывают, что длительное использование агрохимикатов снижает биоразнообразие почвенных бактерий и грибов, что может нарушать процессы разложения органики, фиксации азота и устойчивости к патогенам (см., например, Tsiafouli et al., 2015). Некоторые ГМО-культуры, вырабатывающие инсектицидные белки (например, Bt-токсины), также могут оказывать косвенное влияние на ризосферные микроорганизмы, изменяя состав корневых экссудатов. Это подтверждается исследованиями, где отмечалось снижение биоразнообразия (Krogh et al., 2020), в том числе и азотфиксирующих бактерий в почвах под Bt-кукурузой (Liu et al., 2009).

С точки зрения концепции "жизнь как вычисление», подобные изменения можно интерпретировать как перепрограммирование микробных сетей, ведущее к перераспределению информационных потоков в почве. Например, угнетение симбиотических микроорганизмов может нарушить сигнальные пути между растениями и почвой, что в долгосрочной перспективе снижает продуктивность агроэкосистем. В то же время адаптация микробных сообществ к новым условиям (например, появление устойчивых к пестицидам штаммов) демонстрирует их способность к перезагрузке вычислительных алгоритмов, обеспечивая устойчивость экосистемы (Turrini et al., 2015). Описание этих процессов с точки зрения переноса вещества и энергии мало что дает для их понимания, а следовательно, и прогноза. Антропогенное воздействие на почвенные микроорганизмы требует более глубокого изучения в рамках именно информационно-биологической парадигмы. Анализ того, как химические и генетические вмешательства влияют на "вычислительные" процессы в почве, особенно на их потенциальную мощность, позволит разрабатывать более экологичные агротехнологии, сохраняющие информационный баланс внутри сообществ растений и микробов.

Таким образом, понимание почвенного микробиома как биологической вычислительной платформы открывает путь к созданию интеллектуальных систем мониторинга и управления биоразнообразием. Комбинация метагеномики, машинного обучения и экологического моделирования позволит не только прогнозировать угрозы, но и разрабатывать точные методы биоконтроля, снижая зависимость сельского хозяйства от химических средств защиты. Это особенно актуально в условиях роста устойчивости носителей биотических угроз к традиционным пестицидам и необходимости перехода к устойчивым агроэкологическим практикам.

Урбанизация и антропогенная трансформация почв

Антропогенное воздействие на городские почвы приводит как к глубокой перестройке почвенного профиля, так и к фундаментальному изменению экологических функций антропогенно-преобразованных почв в целом (Горбов, Безуглова, 2019). Как показано в работах (Morel et al., 2005; Горовцов, 2013) урбостратозёмы (Urbic Technosols) формируют уникальные микробные сообщества, адаптированные к условиям городской среды. Современные исследования (Hui et al., 2017) демонстрируют, что понимание этих изменений позволяет разрабатывать эффективные методы рекультивации, основанные на восстановлении естественных внутрисочвенных процессов.

Для поддержания эффективного функционирования отдельных элементов городской зеленой инфраструктуры особенно важно учитывать формирование специфических микробных сообществ. Исследования (Száráz, 2014; Pavao-Zuckerman, 2008) показывают, что даже в условиях сильного антропогенного прессинга городской среды возможно восстановление почвенных экосистем через управление растительными сообществами и почвенной биотой (Горбов и др., 2025). Например, подбор определенных видов растений-фитомелиорантов в сочетании с интродукцией симбиотических микроорганизмов позволяет создать устойчивые контуры обратных связей, обеспечивающих саморегуляцию урбосистемы. Суть экологического инжиниринга городских почв, в первую очередь кибернетическая, – формирование саморегулирующихся контуров на базе рекультивационно-гумусовых рукотворных горизонтов.

Оптимизация землепользования и устойчивое сельское хозяйство

В настоящее время общепризнано, что магистральным путем устойчивого землепользования является точное земледелие. Принципы точного земледелия могут быть реализованы через создание цифровых двойников почвенных систем (Rossiter, 2005, Lagacherie, et al., 2006; Иванов и др., 2025), где каждый участок поля рассматривается как элемент распределенной вычислительной сети.

Как показано в фундаментальном исследовании (McBratney et al., 2017), цифровые модели почвенного покрова позволяют анализировать пространственно-временную изменчивость агрономически значимых параметров с высокой точностью. Эти модели интегрируют данные дистанционного зондирования, результаты почвенных анализов и показатели состояния посевов, формируя комплексное представление об агроэкосистеме. Такой подход обеспечивает возможность прогнозирования реакции почвы на различные

агротехнические воздействия, что принципиально важно для минимизации ошибок при принятии управленческих решений.

Ключевое преимущество цифровых двойников заключается в их способности оптимизировать распределение ресурсов. Исследования демонстрируют, что алгоритмы прецизионного земледелия, основанные на цифровых почвенных моделях, позволяют точно рассчитывать дозы внесения удобрений и средств защиты растений (Gebbers, Adamchuk, 2010). Например, дифференцированное внесение азотных удобрений на основе цифровых карт может снизить их расход на 20–35% без потери урожайности, как это подтверждено в работе (Basso, Antle, 2020). При этом достигается не только экономия ресурсов, но и уменьшение экологической нагрузки.

Перспективы развития цифровых двойников связаны с интеграцией данных в реальном времени. Современные технологии интернета вещей позволяют создавать динамически обновляемые модели, учитывающие изменения влажности почвы и фитосанитарного состояния посевов. Такой подход трансформирует традиционное земледелие в высокоточную наукоемкую отрасль, где каждое решение принимается на основе комплексного анализа данных.

Конкретная оптимизация сельскохозяйственных практик на основе этой модели может быть осуществлена через следующие этапы:

1. Создание цифрового двойника агроценоза. На основе метагеномного и метатранскриптомного анализа конкретного поля строится компьютерное моделирование биологических, химических или физических процессов (*in silico model*) местного микробиома. В нее вводятся данные о типах микроорганизмов, их метаболических путях (например, способности к азотфиксации, солюбилизации фосфатов, синтезу фитогормонов) и сетях взаимодействия между ними.

2. Прогнозирующее моделирование. На этой цифровой модели запускаются симуляции воздействия различных агроприемов, например:

- прогноз изменения активности микробного сообщества при сокращении внесения азотных удобрений на 30%;

- влияние внесения специфического сидерата (например, бобовых) или органического субстрата на активацию групп бактерий-дiazотрофов;

- консорциум микроорганизмов для компенсации снижения минерального питания и перенаправления метаболических потоков сообщества в пользу растения-хозяина, и т.п.

3. Принятие решений. Модель, протестировав тысячи сценариев, идентифицирует точечные вмешательства, которые заставляют микробный ансамбль работать с максимальной эффективностью.

Таким образом, подобное моделирование позволяет перейти от реактивной корректирующей практики к предиктивному управлению, где каждое решение по внесению удобрений или биопрепаратов принимается на основе прогноза отклика сложной вычислительной системы почвенной биоты. Это минимизирует химическую нагрузку, снижая себестоимость продукции и экологический ущерб, при сохранении или даже повышении продуктивности за счет раскрытия естественного потенциала агроэкосистемы.

В современной литературе цифровые аспекты оптимизации землепользования обычно обсуждаются в контексте разработки методов «прицельного» внесения удобрений и управления микробными сообществами почв за счет введения биопрепаратов. Между тем, практическое применение предлагаемой вычислительной методологии позволяет находить нетривиальные подходы в самых неожиданных областях. Рассмотрим в качестве примера проблематику, связанную с применением биочара. Биочар (биоуголь) – это высокопористый углеродный материал, получаемый путем пиролиза (нагревания без доступа кислорода) биомассы: древесины, сельскохозяйственных отходов, органического мусора. Позитивный эффект от его применения связывают обычно со стабилизацией углерода в почве, с влагоудерживающей и сорбционной способностью, с улучшением структуры почвы (Rajput et al., 2023). Такой набор предполагает равномерное внесение биочара в почву, что сводит на нет экономическую эффективность мероприятия, так как требуется внесение десятков тонн на гектар. Между тем, применение цифровой парадигмы заставляет обратить внимание на то, что биочар, в первую очередь, может являться источником сигнальных молекул каррикинов (Kochanek et al., 2016). Это интереснейшая группа соединений – продуктов пиролиза растительных остатков. Было показано, что каррикины играют в биоценозах роль сигнала, стимулирующего быстрый рост растительности после степных и лесных пожаров (Luo et al., 2016).

Эволюционно их появление в экосистеме было связано с событиями, которые уничтожали существующую биоту, но давали шанс новой. Поэтому растения выработали специфические механизмы восприятия этих сигналов как предикторов кардинальных изменений среды. Эти соединения являются не токсинами или питательными субстратами, а высокоэффективными информационными паттернами, которые модулируют вычислительные процессы растения, переводя его в состояние оптимизированной продуктивности и

устойчивости. С вычислительной точки зрения, каррикин выступает в роли триггера, инициирующего выполнение комплекса предзаложенных, но неактивных программ адаптации. Молекулы глиоксаля и сходных карбонильных производных взаимодействуют с клеточными сенсорами (редокс-системами, рецепторными белками), что интерпретируется системой как ввод критических данных об изменении внешних условий. Это запускает каскад вычислительных операций: перераспределение ресурсов с текущих задач на стратегические, активацию библиотек защитных функций (синтез антиоксидантных ферментов, осмотиков) и модуляцию гормональных сетей (сдвиг баланса от абсцизовой кислоты к ауксинам и гиббереллинам). Ключевой результат — возникновение кросс-толерантности, то есть неспецифической устойчивости к будущим стрессам, что эквивалентно упреждающей оптимизации вычислительной системы перед пиковой нагрузкой.

Такой взгляд создает научную платформу для прецизионного использования каррикинов в сельском хозяйстве как инструментов многоуровневого управления ключевыми функциями растений. Поскольку основные решения принимаются геномными вычислительными сетями растений уже на этапе прорастания семян, можно сделать прогноз о том, что максимально эффективным способом внесения биочара будет напыление суспензии его микрочастиц со стандартным адьювантом на поверхность семян перед посевом. Считаем, что это может быть осуществлено с помощью стандартной сельхозтехники типа протравливателей семян (ПС-10 и др.). При этом расход действующего вещества будет снижен на порядки с соответствующим повышением экономической эффективности.

Есть и другие примеры регулирования информационно-насыщенных связей в почвенной среде. Так, листовая обработка сельскохозяйственных растений гуминовыми препаратами не только укрепляет иммунитет растений и корректирует их стрессоустойчивость, но и изменяет состав корневых выделений в соответствии с возросшими потребностями растения. Как следствие, в зоне микоризы возрастает численность соответствующей группы микроорганизмов и увеличивается содержание доступных соединений фосфора, азота либо калия (Полиенко и др., 2017; Безуглова и др., 2018; Наими и др. 2020). Например, труднодоступные соединения фосфора переходят в подвижное состояние, что связано с увеличением численности микроорганизмов в зоне микоризы (Дубинина, Безуглова, 2022).

В заключение раздела хотелось бы заметить, что хотя большинство рассматриваемых в работе примеров связано с эксплуатацией вычислительных

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 2 // «Живые и биокосные системы». – 2026. – № 55; URL: <https://jbks.ru/archive/issue-55/article-22>; DOI: 10.18522/2308-9709-2026-55-22

возможностей живого вещества (живой компоненты) почвы, информационные возможности ее косной части также весьма велики (что мы попытались продемонстрировать своими рассуждениями о механизмах действия биочара и гуминового препарата). Как полив, так и внесение удобрений можно рассматривать в качестве сигналов, а, следовательно, обратить внимание на возможность их модуляции с развитием эмерджентных эффектов. Изучение этих вопросов является перспективной задачей современного почвоведения.

Водные ресурсы и почвенно-гидрологические процессы

Современные подходы к математическому моделированию гидрологических процессов в почвах, рассматриваемые как алгоритмы обработки информации (Vereecken, H., et al. 2016), открывают новые возможности для решения проблемы опустынивания. Эти модели, интегрирующие данные о водном балансе, физических и химических свойствах почв, а также климатических параметрах, позволяют прогнозировать динамику опустынивания отдельных территорий и разрабатывать превентивные меры по ее сдерживанию. Особую ценность представляет сочетание гидрологических моделей с метагеномным анализом почвенных микробных сообществ, поскольку микроорганизмы играют ключевую роль в формировании водно-физических свойств почв и их устойчивости к деградации (Чернов, Семенов, 2021).

Интеграция данных метагеномики в системы моделирования позволяет оптимизировать оросительные режимы с учетом биологической активности почв, принимая во внимание влагоудерживающую способность и доминирующий тип растительных формаций. Исследования (Nicotra, 2025) демонстрируют, что определенные микробные консорциумы способны улучшать водный режим почв за счет выработки экзополисахаридов, ведущей к изменению их (почв) агрегатной структуры. Это открывает перспективы для разработки систем орошения нового поколения, управляемым, в том числе, и данными о состоянии микробиома. Такой подход особенно важен для аридных регионов, где традиционные методы орошения часто приводят к вторичному засолению и, как следствие, к деградации почв.

Перспективным направлением является создание комплексных моделей, объединяющих гидрологические процессы, растительные сообщества и микробную активность. Как показано в работе (Rillig et al., 2019), учет микробного компонента позволяет значительно повысить точность прогнозирования устойчивости экосистем к опустыниванию. Это создает научную основу для разработки адаптивных систем землепользования,

сочетающих инженерные решения с биологическими методами восстановления деградированных земель.

Взаимодействие педосферы и биосферы в глобальных биогеохимических циклах

Круговорот элементов в почвах может быть представлен как глобальная вычислительная система (Schlesinger, Bernhardt, 2020), где каждый биохимический процесс выполняет специфические преобразования информации.

Представление биогеохимических циклов в виде глобальной вычислительной системы (Schlesinger, Bernhardt, 2020) позволяет переосмыслить традиционные подходы к изучению круговорота элементов. В этой системе каждый биохимический процесс (фиксация азота, разложение органики, окислительно-восстановительные реакции) выступает как дискретный вычислительный модуль, преобразующий информацию, закодированную в молекулярных структурах. Особенно важно, что такая модель раскрывает принципиально новый аспект – возможность анализа элементарных педогенетических процессов через призму теории информации, где потоки вещества рассматриваются как передача данных между биологическими "процессорами" (микробными сообществами, корневыми системами и др.). Анализ аналогий оптимальности биологического процессинга и производительности вычислительных алгоритмов позволяет находить ранее незаметные закономерности (Falkowski et al., 2008). Работа этой глобальной вычислительной сети основана на сложном взаимодействии цифровых и аналоговых операций. Цифровая составляющая проявляется в дискретных биохимических реакциях (например, фиксация одной молекулы N_2 азотфиксирующими бактериями), которые можно рассматривать как бинарные логические операции. Аналоговый компонент представлен градиентами концентраций, непрерывными потоками веществ и энергетическими полями, выполняющими роль аналоговых вычислительных схем. Особенно наглядно это взаимодействие проявляется в процессах почвенного катализа, где ферментативные системы микробов работают как гибридные аналого-цифровые преобразователи, переводя инструментарием динамических биохимических процессов непрерывные химические градиенты в дискретные молекулярные сигналы, основанные на синтезе РНК определенных последовательностей (Schlesinger, Bernhardt, 2020; Dennis et al., 2010; Schlaeppli, Bulgarelli, 2015). Такая двойственность обеспечивает уникальную адаптивность системы, позволяя одновременно обрабатывать как количественные (концентрации элементов), так и качественные (молекулярные структуры) параметры.

Перспективы этого подхода связаны с возможностью моделирования биогеохимических циклов как распределённых вычислительных сетей, где отдельные диагностические горизонты в почвенном профиле, объединяются в характерные для данной экосистемы комбинации почвенных типов и выступают в роли взаимосвязанных процессоров. Это открывает новые возможности для прогнозирования последствий антропогенного воздействия и разработки принципиально новых методов управления почвенными процессами через перепрограммирование микробных сообществ.

Развитие методов диагностики и мониторинга почв

Многое из вышеизложенного так или иначе касается разработки методологии и развития системы мониторинга почв. Чтобы не повторяться, остановимся на принципиально новых аспектах этой проблематики, открываемых в рамках концепции «жизнь как вычисление».

Интеграция квантовых вычислений и искусственного интеллекта в системы дистанционного мониторинга почв (Nocita et al., 2015) обусловлена необходимостью обработки экстремально сложных многомерных данных спектроскопии. Традиционные вычислительные методы сталкиваются с принципиальными ограничениями при анализе квантовых характеристик почвенного отражения, где каждый спектральный пик представляет собой суперпозицию множества почвенных параметров. Квантовые алгоритмы, в частности квантовое машинное обучение (Viamonte et al., 2017), позволяют одновременно анализировать все возможные комбинации почвенных характеристик в квантовой суперпозиции, что невозможно в классических вычислениях. Это особенно важно для решения обратных задач спектроскопии, где необходимо восстановить многомерное распределение свойств почвы по её спектральной сигнатуре.

Перспективы развития этого направления связаны с созданием гибридных квантово-классических нейросетевых архитектур, способных обрабатывать почвенные данные на принципиально новом уровне. Исследования (Гаевая, Безуглова, 2024, 2025; Minaee et al., 2022) демонстрируют, что квантовые нейросети могут выявлять сложные нелинейные взаимосвязи между спектральными характеристиками и агрохимическими свойствами почв, которые остаются незамеченными при классическом анализе. Например, квантовые алгоритмы способны одновременно оптимизировать тысячи параметров модели, учитывая квантовую природу взаимодействия света с почвенными частицами, что

критически важно для точного определения содержания органического вещества или тяжелых металлов.

В статье А.В. Жоголева и И.Ю. Савина (Жоголев, Савин, 2025) предложено изменить подход к цифровому обновлению традиционных почвенных карт на основе логики, которая вполне соответствует концепции «жизнь как вычисление». Авторы разработали программный инструмент IMSOIL на языке R, который формализует качественные знания о географии почв в виде количественных правил картографирования, сочетая преимущества статистического анализа с экспертными оценками. Фактически осуществляется имитация экспертного мышления средствами вычислительных алгоритмов.

С позиций концепции «жизнь как вычисление» данный метод можно рассматривать как создание вычислительной модели почвообразования, где факторы среды выступают входными параметрами, а пространственное распределение почв — результатом алгоритмической обработки. Особенность подхода — сохранение интерпретируемости модели (деревья решений) при интеграции спутниковых данных и тематических карт. Генерируемая карта вероятностей ошибок обеспечивает обратную связь, одновременно придавая системе гибкость, позволяя адаптироваться к новым данным подобно самообучающимся биологическим системам.

Таким образом, работа открывает перспективы для развития цифровой экологии, где почвенный покров рассматривается как динамическая вычислительная система, хранилище информации о прошлых и текущих экологических процессах. Метод Жоголева и Савина превращает информацию в структурированный датасет, пригодный для прогнозного моделирования (например, изменения климата или сельхозугодий).

В заключении данного пункта необходимо отметить, что фундаментальное значение имеет переход к системам мониторинга в реальном времени, где сенсоры и процессоры будут работать в замкнутом цикле с беспилотными аппаратами. Это позволит создать динамические цифровые двойники почвенного покрова, обновляемые с высокой точностью. Развитие интернета вещей, особенно с внедрением квантовых вычислений, откроет возможность глобального мониторинга почвенных ресурсов с беспрецедентным пространственно-временным разрешением, что станет основой для новой парадигмы точного земледелия.

Заключение

Во второй части обзора мы сосредоточились на проблемах, связанных с почвенным биоразнообразием, антропогенной трансформацией (включая урбопочвы) и развитием методов диагностики и мониторинга. Показано, что концепция «жизнь как вычисление» предоставляет эвристически плодотворную рамку для анализа сложных биотических взаимодействий, потоков информации и адаптивных реакций почвенных экосистем.

Наша аналитическая работа, результаты которой представлены в данном обзоре, во многом является развитием идей Евгения Петровича Гуськова о коммуникативности, как основном факторе эволюции органического мира, изложенных им в одной из его последних работ (Гуськов, 2005). Е.П. Гуськов подчеркивал, что биологические системы функционируют как сети, где ключевую роль играют взаимодействия, основанные на обмене сигналами. Однако в начале 2000-х годов многие аспекты этой концепции оставались нераскрытыми из-за ограниченности методов анализа, в частности низкого разрешения молекулярных технологий и отсутствия инструментов для изучения больших массивов данных, включая метагеномные, в реальном времени.

Сегодня, благодаря развитию технологий «больших данных», высокопроизводительного секвенирования, метагеномики и биоинформатики, стало возможным исследовать почвенные биокосные структуры как сложные вычислительные системы, где каждый микроорганизм выполняет роль процессора, обрабатывающего химические и физические сигналы/данные. Е.П. Гуськов отмечал, что коммуникативность — это фундаментальное свойство живых систем, обеспечивающее их адаптацию и эволюцию. В почвенной экосистеме это проявляется в способности микробных сообществ координировать метаболические пути, реагировать на изменения среды и поддерживать гомеостаз почвы.

Одним из ключевых аспектов, который не мог быть полноценно изучен два десятилетия назад, является роль эпигенетических механизмов в адаптации почвенных микроорганизмов. Е.П. Гуськов указывал на важность соматической памяти и длительных модификаций, которые не требуют изменений в ДНК, но влияют на фенотипическую пластичность. Современные исследования подтверждают, что почвенные организмы способны "перепрограммировать" свои метаболические пути в ответ на стресс, например засуху или загрязнение агрохимикатами, именно по эпигенетическому механизму, что согласуется с идеей "упорядоченной случайности". Методы «мик одной клетки» и транскриптомики теперь позволяют отслеживать эти процессы на уровне, недоступном еще несколько лет назад.

Резюмируя, нам хотелось бы подчеркнуть практическую значимость рассматриваемых вопросов. Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации (Указ Президента Российской Федерации от 28.02.2024 г. № 145) предусматривает противодействие техногенным и биогенным угрозам с помощью передовых технологий на основе высокопроизводительных вычислительных систем. В условиях возрастающей актуальности синтетических дисциплин и необходимости создания принципиально нового методологического аппарата, позволяющего предлагать новые подходы, применение концепции «жизнь как вычисление» для решения актуальных проблем почвоведения представляется обоснованным и перспективным. Интеграция современных вычислительных подходов с традиционными почвенными исследованиями создает возможности для разработки инновационных технологий сохранения и восстановления почвенных ресурсов. Системный анализ как отдельно взятых элементарных почвообразовательных процессов, так и совокупного внутрипочвенного перемещения вещества и энергии предполагает с учетом концепции «жизнь как вычисление» возможность дополнения традиционного понятийного аппарата почвоведения такими терминами как «цифровое почвоведение», «почва как вычислительная сеть», «алгоритмы почвенных процессов», «цифровая устойчивость почв».

С этой точки зрения особое значение для сельского хозяйства, сравнимое с обеспечением минеральными удобрениями, средствами защиты растений и передовой техникой, приобретает цифровизация почвоведения, отправной точкой которого должно стать создание «Цифрового атласа почв России» (Жоголев, Савин, 2025). В этом случае реальные очертания приобретает возможность масштабирования агротехнологий без потери адресности, с учетом особенностей отдельных локаций. Реализация такого подхода позволит отслеживать и прогнозировать малейшие изменения в системе, выражая их не только в биологических, химических, но и в экономических категориях, основанных на вполне точных математических алгоритмах.

Таким образом, концепция "жизнь как вычисление" предлагает принципиально новый методологический аппарат для решения актуальных проблем почвоведения. При этом интеграция современных вычислительных подходов с традиционными почвенными исследованиями открывает перспективы для разработки инновационных технологий сохранения и восстановления почвенных ресурсов.

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. Безуглова О. С., Лыхман В. А., Горовцов А. В., Полиенко Е. А., Дубинина М.Н. Адаптогенное действие гуминового препарата при возделывании озимой пшеницы // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. №11. С. 53–56. DOI: 10.24411/0235-2451-2018-11114.
2. 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>.
3. 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>.
4. 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.
5. Горбов С.Н., Терехов И.В., Безуглова О.С. и др. Многолетняя динамика эмиссии углерода в конструкторных зонах под газонами в условиях степной зоны // Почвоведение. 2025. № 5. С. 728–738. DOI: 10.31857/S0032180X25050135.
6. Горовцов А.В. Характеристика ряда эколого-трофических групп в составе микробсообществ урбопочв г. Ростов-на-Дону и их чувствительность к антропогенной нагрузке // Изв. вузов. Сев.-Кав. регион. Естеств. науки. 2013. №3. С. 53–57.

7. Гуськов Е.П. Коммуникативность как фактор органической эволюции // Научная мысль Кавказа. 2005. №1. С.3-17.
8. Добровольский Г.В. Педосфера – оболочка жизни планеты Земля // Биосфера. 2010. Т. 1. С. 6–14.
9. Дубинина М.Н., Безуглова О.С. Влияние гуминового препарата на фракционно-групповой состав фосфатов в черноземе обыкновенном карбонатном // Известия ВУЗОВ. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2022. № 1. – С. 38–48. DOI: 10.18522/1026-2237-2022-1-38-48.
10. Жоголев А.В., Савин И.Ю. Цифровое обновление традиционно составленных почвенных карт // Почвоведение. 2025. С. 435–448.
11. Иванов А.Л., Болотов А.Г., Козлов Д.Н. и др. Цифровые двойники почв как новый технологический уклад генетического и прикладного почвоведения // Почвоведение. 2025. № 6. С. 757–770. DOI: 10.31857/S0032180X25060015.
12. Наими О.И., Безуглова О.С., Полиенко Е.А., Лыхман В.А., Горовцов А.В., Поволоцкая Ю.С., Дубинина М.Н., Патрикеев Е.С. Фосфатный режим и активность фосфатазы в черноземе обыкновенном при возделывании нута // Агрехимический вестник, 2020. №3. С. 25–29. DOI: 10.24411/1029-2551-2020-10034.
13. 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
14. Роль почвы в формировании и сохранении биологического разнообразия / Г.В. Добровольский, И.Ю. Чернов (отв. ред.). М.: Товарищество научных изданий КМК, 2011. 273 с.
15. Указ Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145 "О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации" от 29 февраля 2024 г. <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202402280003> (дата обращения: 04.08.2025 г.)
16. Чернов Т.И., Семенов М.В. Управление почвенными микробными сообществами: возможности и перспективы (обзор) // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1506–1522. DOI: 10.31857/S0032180X2112002.
17. 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>.

18. Basso B., Antle J. Digital agriculture to design sustainable agricultural systems // *Nature Sustainability*. 2020. Vol. 3. P. 254-256. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0510-0>.
19. Biamonte J., Wittek P., Pancotti N. et al. Quantum machine learning // *Nature*. 2017. Vol. 549(7671). P. 195-202. <https://doi.org/10.1038/nature23474>.
20. Dennis P.G., Miller A.J., Hirsch P.R. Are root exudates more important than other sources of rhizodeposits in structuring rhizosphere bacterial communities? // *FEMS Microbiology Ecology*. 2010. Vol. 72(3). P. 313-327. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2010.00860.x>.
21. Falkowski P.G., Fenchel T., Delong E.F. The microbial engines that drive Earth's biogeochemical cycles // *Science*. 2008. Vol. 320(5879). P. 1034-1039. <https://doi.org/10.1126/science.1153213>.
22. Fierer N., Leff J.W., Adams B.J. et al. Cross-biome metagenomic analyses of soil microbial communities and their functional attributes // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2012. Vol. 109(52). P. 21390-21395. <https://doi.org/10.1073/pnas.1215210110>.
23. Gebbers R., Adamchuk V.I. Precision agriculture and food security // *Science*. 2010. Vol. 327(5967). P. 828-831. <https://doi.org/10.1126/science.1183899>.
24. Hui N., Jumpponen A., Francini G. et al. Soil microbial communities are shaped by vegetation type and park age in cities under cold climate // *Environmental Microbiology*. 2017. Vol. 19(3). P. 1281-1295. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.13660>.
25. Kochanek J, Long RL, Lisle AT, Flematti GR. Karrikins Identified in Biochars Indicate Post-Fire Chemical Cues Can Influence Community Diversity and Plant Development. *PLoS One*. 2016;11(8):e0161234. Published 2016 Aug 18. doi:10.1371/journal.pone.0161234
26. Krogh P.H., Kostov K., Damgaard C.F. The effect of Bt crops on soil invertebrates: a systematic review and quantitative meta-analysis // *Transgenic Research*. 2020. Vol. 29. № 5-6. P. 487-498. <https://doi.org/10.1007/s11248-020-00213-y>.
27. Lagacherie P., McBratney A., Voltz M. (eds.) *Digital Soil Mapping - An Introductory Perspective*. Elsevier, 2006. 658 p. ISBN: 9780080468075.
28. Li W., Liu P., Jin Y., Chen L., Zhao M., Wu L., Lan S. Microbial community composition and interactions in saline biocrusts: Insights into cyanobacterial inoculation for soil restoration// *Applied Soil Ecology*. 2025. Vol. 212. P. 106225. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106225>.

29. Liu W. Effects of Bt transgenic crops on soil ecosystems: a review of a ten-year research in China // *Frontiers of Agriculture in China*. 2009. Vol. 3. P. 190-198. <https://doi.org/10.1007/s11703-009-0027-9>.
30. 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
31. Luo X, Qi Y, Meng YJ, et al. (Current understanding of signaling transduction pathway and biological functions of Karrikins)// *Yi Chuan*. 2016;38(1):52-61. doi:10.16288/j.ycz.15-275
32. McBratney A. et al. *Soil Security: A Rationale* // *Global Soil Security*. 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-43394-3_1.
33. 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.
34. Morel J.-L. et al. Urban soils // *Encyclopedia of Soils in the Environment*. 2005. P. 202–208. DOI: 10.1016/B0-12-348530-4/00305-2.
35. Nicotra D. et al. Mitigating Water Stress in Plants with Beneficial Bacteria: Effects on Growth and Rhizosphere Bacterial Communities // *International Journal of Molecular Sciences*. 2025. Vol. 26(4). P. 1467. DOI: 10.3390/ijms26041467.
36. Nocita M. et al. Soil Spectroscopy: An Alternative to Wet Chemistry for Soil Monitoring // *Advances in Agronomy*. 2015. Vol. 132. P. 139-159. DOI: 10.1016/bs.agron.2015.02.002.
37. Pavao-Zuckerman M.A. The nature of urban soils and their role in ecological restoration in cities // *Restoration Ecology*. 2008. Vol. 16(4). P. 642-649. DOI: 10.1111/j.1526-100X.2008.00486.x.
38. Rajput V.D., Kumari A., Minkina T., et al. A practical evaluation on integrated role of biochar and nanomaterials in soil remediation processes. *Environ Geochem Health*. 2023;45(12):9435-9449. doi:10.1007/s10653-022-01375-w
39. Rillig M.C. et al. The role of multiple global change factors in driving soil functions and microbial biodiversity // *Science*. 2019. Vol. 366(6467). P. 886-890. DOI: 10.1126/science.aay2832.
40. Rossiter D. Digital soil mapping: towards a multiple-use soil information system // *Análisis Geográficos*. 2005. Vol. 32(1). P. 7-15.
41. Schlaeppi K., Bulgarelli D. The plant microbiome at work // *Molecular Plant-Microbe Interactions*. 2015. Vol. 28(3). P. 212-217. DOI: 10.1094/MPMI-10-14-0334-FI.

42. Schlesinger W.H., Bernhardt E.S. *Biogeochemistry: An Analysis of Global Change*. 4th ed. Academic Press, 2020. 672 p.
43. Száraz L. The Impact of Urban Green Spaces on Climate and Air Quality in Cities // *Geographical Locality Studies*. 2014. Vol. 2. P. 326-354.
44. 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
45. 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>.
46. 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>.
47. Vereecken H. et al. Modeling soil processes: Review, key challenges, and new perspectives // *Vadose Zone Journal*. 2016. Vol. 15(5). P. 1-57. DOI: 10.2136/vzj2015.09.0131.
48. Zenil H. (2012). *A Computable Universe: Understanding and Exploring Nature as Computation*. Singapore: World Scientific, 2013. - 810 p. ISBN 978-981-4374-29-3.

THE CONCEPT OF "LIFE AS COMPUTATION" IN THE SYSTEM ANALYSIS OF SOIL PROCESSES (REVIEW). PART 2.

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

brenanzhelika@yandex.ru*

Abstract

Continuation of the analytical review devoted to substantiating the feasibility and limitations of the concept of "life as a computation" in relation to the systematic analysis of key soil processes and solving urgent problems of modern soil science. *The second* part of the review is devoted to the analysis of the applicability of the concept of "life as computation" to research tasks that lie at the intersection of soil biology, anthropogenic transformation and big data processing methods. *The object* of the analysis is the problems of biodiversity conservation, functioning of urbanized soils, optimization of land use and modern monitoring (GIS, remote sensing, AI). It is shown that the soil microbial community can be considered as a distributed network structure implementing the principles of "biocomputation" through metabolic pathways and horizontal gene transfer. *Special attention* is paid to the role of rhizospheric interactions as channels of information exchange in the soil-plant system. It discusses how artificial intelligence and machine learning methods used to classify soils (including urban ones) and predict their properties are actually a "meta-level" analysis of the computational abilities of the pedosphere. It is shown that the concept of "life as computation" opens up new perspectives for system analysis and modeling of soil processes, however, its application requires taking into account the emergent properties of biological systems; in general, the integration of this concept into soil science contributes to the formation of a new methodological framework that meets the anthropocene challenges.

Keywords

"Life as computation", soil biodiversity, urban ecosystems, digital soil science, artificial intelligence, soil-ecological interactions, sustainable agriculture, diagnostics, monitoring.

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