

ДЕГРАДАЦИЯ, ВОССТАНОВЛЕНИЕ И ОХРАНА ПОЧВ

УДК 631.4

ЭКОСИСТЕМНЫЕ СЕРВИСЫ, РЕАЛИЗУЕМЫЕ ГОРОДСКИМИ ПОЧВАМИ, И ИХ ОЦЕНКА (ОБЗОР)

© 2024 г. К. С. Орлова^{а, *}, И. Ю. Савин^{а, б}

^аПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 2, 119017 Россия

^бРоссийский университет дружбы народов, Москва, Подольское ш., 8, 115095 Россия

*e-mail: orlkse@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.09.2023 г.

После доработки 18.01.2024 г.

Принята к публикации 18.01.2024 г.

Рассмотрена история развития концепции сервисов городских почв, антропоцентрические и педоцентрические подходы к их оценке, опыт применения в различных городах, представлен их актуальный перечень. В настоящее время концепция экосистемных сервисов является комплексным инструментом, позволяющим по аналогии транслировать почвенную информацию в сферу принятия управленческих решений, а также сохранять устойчивость городских экосистем путем внедрения мер по сохранению сервисов городских почв. Несмотря на накопленный опыт в изучении методов оценки экосистемных сервисов и примеров их применения в процессе градостроительной деятельности в отдельных городах, отсутствует единый подход к оценке сервисов городских почв. Широкому применению данной концепции зачастую препятствует недостаточная изученность свойств городских почв при их высокой пространственно-временной изменчивости, а также недостаточная разработанность самого подхода оценки сервисов почв. Тем не менее, активное развитие теоретических и практических подходов к интеграции сведений о характеристиках почв в управленческую сферу является предпосылкой для оптимизации системы обращения с почвенными ресурсами в больших и малых городах.

Ключевые слова: экология города, качество окружающей среды, экосистемное управление, почвенные ресурсы

DOI: 10.31857/S0032180X24060083, **EDN:** YBMOIO

ВВЕДЕНИЕ

Рост количества городов и их размеров является тенденцией последних несколько десятков лет практически во всех регионах мира. По данным Департамента экономических и социальных дел ООН, предоставленным в отчете 2018 г., о мировых перспективах урбанизации, в 1950 г. на планете насчитывалось 751 млн чел., проживающих в городах, в 2021 г. по приблизительным оценкам это число достигло 4.46 млрд чел. [102, 104, 105]. По прогнозам ООН к 2050 г. в городах будет проживать до 6.68 млрд чел (68% населения). Наибольший уровень урбанизации в настоящее время отмечается в странах Северной и Латинской Америки, Карибского бассейна, Европы и Океании. Отмечается стремительный рост городского населения в зарубежной Азии (Китай, Индия и др.), где в данный момент уровень урбанизации составляет около 52%. В таких странах, как Гонконг, Сингапур,

Монако, Кувейт и др. уровень урбанизации достигает 100%. По данным Росстата, в 2021 г. в России в городах проживало 75% населения (~110 млн чел.) [3]. В России отмечается и рост площади урбоэкосистем [39].

В условиях быстрого экономического развития и урбанизации роль почв, как источника и проводника важнейших экологических процессов, становится еще более актуальной для обеспечения здоровья человека и функционирования окружающей среды. В исследованиях [53] отмечается, что площадь, занятая городскими почвами, составляет около 3% всей земной поверхности на планете и постоянно растет.

Городские почвы выполняют важнейшие экологические функции, являясь источником плодородия для городской растительности [103], регулируя микроклимат и являясь механической основой для инфраструктуры и инженерных

коммуникаций [54]. Почвы урбанизированных территорий входят в состав региональных водосборов и регулируют сток поверхностных и подземных вод [80]. В глобальном масштабе городские почвы включены в круговорот питательных веществ и могут способствовать смягчению последствий изменения климата за счет поглощения углерода из атмосферы и его депонирования [52, 76, 88, 89, 94]. Таким образом, для оценки качества окружающей среды в крупных и малых городах крайне важен анализ экологического состояния и функционирования почв, а также их способности предоставлять важные для человека сервисы (услуги).

За счет миграции людей по всему миру происходит рост городов, площадей застройки, интенсификации хозяйственной градостроительной деятельности, что в свою очередь сказывается на почвах, их функционировании и сервисах [13, 14, 91]. Например, чрезмерное уплотнение почв в городах приводит к уменьшению инфильтрации, сокращению площадей плодородных земель [56]. Привнесение грунта с высоким содержанием органического вещества при благоустройстве в скверах и парках, находящихся в городских тепловых островах, приводит к образованию горячих точек эмиссии CO₂ [108]; а загрязнение почв тяжелыми металлами и продуктами неполного сгорания топлива автотранспорта приводит к прямой опасности для здоровья человека [58, 74, 90, 92]. Многие из этих процессов, связанных с городскими почвами, могут повлиять на достижение целей устойчивого развития в Российской Федерации на городских территориях [17], в особенности задач 11.3 “Открытая для всех и экологически устойчивая урбанизация”, 11.6 “Уменьшение негативного экологического воздействия городов, уделяя особое внимание качеству воздуха и удалению городских отходов”, которые напрямую связаны с функционированием почв.

Городские почвы являются объектами современных научных исследований, источниками ключевых экологических функций, способствующих формированию благоприятной экологической обстановки в городах [30], в то же время оставаясь наименее заметным компонентом окружающей среды [80, 84]. В подавляющем большинстве случаев при планировании городских территорий и застройке земель [63] ответственные организации воспринимают почву как простую механическую платформу или грунт, подлежащий удалению при проведении хозяйственных работ. Учет роли почв, их функций и сервисов в городском пространстве производится крайне редко [36, 103], что приводит к отсутствию осведомленности населения о потенциальном вкладе, который городские почвы могут внести не только в благосостояние жителей, но и регулирования глобальных задач, таких, например,

как смягчение последствий наблюдаемых изменений климата [80].

Цель работы — обзор научных публикаций в области изучения сервисов, выполняемых городскими почвами, для выявления возможности применения данной концепции при оценке роли городских почв в формировании качества окружающей среды на урбанизированных территориях. Задачами являлось рассмотрение современного развития концепции сервисов городских почв; выявление потенциала ее применения для повышения экологической устойчивости городов; проведение обзора подходов и существующих практик для оценки качества и экологического состояния городских почв; рассмотрение методов и подходов, позволяющих применять и интерпретировать экологическую информацию о почвах в процессе градостроительной деятельности; выявление возможных перспектив развития данной концепции. Для раскрытия поставленных задач в системах: WoS, Scopus, Google Scholar и РИНЦ — подбирали литературу по ключевым словам: ecosystem services, urban soils, soil functions, urban soil quality, soil management др.

КОНЦЕПЦИЯ ЭКОСИСТЕМНЫХ СЕРВИСОВ

В рамках существующих классификаций экосистемные сервисы (ЭС) определяются как прямой или косвенный вклад экосистемы в благосостояние человека [60, 102]. МЕА [79] определяет экосистемные сервисы как выгоды, которые экосистемы приносят людям. В публикации [40] авторы определяют “экосистемные сервисы” как экономические блага (выгоды), которое люди прямо или косвенно получают от функционирования экосистем.

Основная структура и принципы концепции ЭС представлены в работах: МЕА [79], ТЕЕВ [101], CICES [60, 61], SEEA [106], IPBES [32, 82]. Для определения и классификации ЭС используются различные подходы. Наиболее цитируемой классификацией ЭС является классификация МЕА [43, 79]. В ней указано на существование таких “функций экосистем” (ecosystem functions), которые определяют получение в результате функционирования экосистемы сервисов, приносящих непосредственную пользу людям. ЭС в рамках подхода МЕА разделены на поддерживающие (вспомогательные), обеспечивающие, регулирующие и культурные [6, 79, 43].

В классификации CICES [60] модифицируется подход МЕА, который исключает группу поддерживающих сервисов с целью минимизировать возможность двойного учета благ. Отмечается [36], что исключение поддерживающих сервисов из классификации может отрицательно сказываться на экономическом анализе почвенных сервисов, так как из внимания пропадает часть важных собствен почвенных процессов, которые влияют на

предоставление сервисов. Однако в современной версии CICES v5.1 [61] объединяет группу поддерживающих сервисов с регулируемыми и вводит понятие абиотической и биотической природы всех сервисов, разделяя их на две секции (biotic и abiotic).

Федеральное управление по охране окружающей среды (FOEN) определяет экосистемные сервисы и блага (FEGS [45]), как товары или услуги, которые предоставляются природой напрямую и потребляются людьми или используются для производства рыночных товаров. Таким образом, термин FEGS проводит разделение между сервисами, способствующими реализации других ЭС, и сервисами, непосредственно определяющими благополучие или обеспечивающими производство товара или услуги.

В настоящее время концепция ЭС активно развивается и рассматривается с точки зрения разных подходов и дополняется новыми методами исследований. Концепция применима для оценки сервисов не только целых экосистем или ландшафтов, но и отдельных природных компонентов.

ПОЧВЫ В КОНЦЕПЦИИ ЭКОСИСТЕМНЫХ СЕРВИСОВ

В рамках определения ЭС МЭА [43, 80] можно считать, что сервисы почв реализуются через их экологические функции и определяются как вклад непосредственно почв (а не экосистем в целом) в благополучие жизнедеятельности человека или как экономические выгоды, которые человек получает благодаря сервисам, предоставляемым именно почвами. Во многих случаях вычлнить только почвенную составляющую сложно, так как экосистемные сервисы существуют лишь во взаимосвязи всех компонентов экосистем. Тем не менее, свойства и функции почв часто играют определяющую роль в функционировании городских экосистем, и оценка именно их вклада в ЭС представляет большой интерес.

До начала 2010-х гг. роли почв в структуре экосистемных сервисов уделялось мало внимания. В работах [48, 49, 51, 91] рассмотрены структура и механизмы реализации экосистемных сервисов, оказываемых именно почвами (как одного из компонентов экосистемы), а также оценен общий вклад почв в жизнь человека и их возможностей при решении различных экологических проблем. Позднее были изучены подходы к оценке почвенных сервисов, в том числе базирующиеся на изучении отдельных почвенных характеристик [13, 22, 35]. В работе [80] впервые рассматриваются именно почвенные сервисы городских и техногенных почв, приводится исследование потенциала реализации сервисов городскими и техногенными почвами четырех групп: квазиприродных, сконструированных,

почв заброшенных территорий и запечатанных почв.

Необходимо отметить, что функции и сервисы почв (в том числе и городских) были объектом множества комплексных и детальных исследований на протяжении последних десятилетий, и осознание многофункциональности почв было широко признано до появления концепции ЭС [4, 9, 35, 107].

В настоящее время активно исследуются подходы по интеграции почвенной информации в городское планирование и систему принятия управленческих решений на основании анализа сервисов городских почв [28, 35, 55, 106].

В научной литературе сервисы городских почв рассматривались в меньшей степени в сравнении с почвами внегородских территорий. Впервые перечень сервисов городских и техногенных почв приводится в публикации [80], в который включены только обеспечивающие, регулирующие и культурные сервисы в достаточно генерализованных трактовках. Также отмечается, что почвы могут продуцировать “диссервисы”, негативно воздействуя на окружающую среду и благосостояние человека. Однако авторы [20] при исследовании возможностей экономической оценки ущерба от деградации земель на основании почвенных сервисов отмечают, что в отличие от функции, экосистемные сервисы для человека могут проявляться только в положительном значении, так как в их определении заложено получение выгоды.

В библиометрическом анализе [78] указано, что большая часть научной литературы (125 источников за период 1997–2019), посвященной сервисам, оказываемым городскими почвами, предназначена исследованию группы поддерживающих сервисов, далее идут регулирующие, обеспечивающие и культурные сервисы. Авторы отмечают, что культурные сервисы никак не отражены в научных работах. Но, в качестве примера подобных оценок, можно привести работы [11, 16].

В работе [43] приводит наиболее полный перечень сервисов, оказываемых городскими почвами, который основан на интеграции современных классификаций [79] и данных отдельных исследований [24, 49, 26]:

1. Поддерживающие сервисы:
 - 1.1. Круговорот питательных веществ.
 - 1.2. Круговорот воды.
 - 1.3. Биологическая активность почв.
 - 1.4. Почвообразование.
 - 1.5. Плодородие.
2. Обеспечивающие сервисы:
 - 2.1. Чистая питьевая вода (поверхностных и подземных источников).
 - 2.2. Продукция (пища, корма и др. питательные вещества), топливо, сырье, материалы.

- 2.3. Источник биохимических и фармацевтических ресурсов.
- 2.4. Обеспечение жизненного пространства организмам, физическая опора для растений.
- 2.5. Источник генетических ресурсов и биоразнообразия.
- 2.6. Физическая опора для человеческой деятельности.
3. Регулирующие сервисы:
 - 3.1. Контроль поверхностного стока, дренаж и буфер.
 - 3.2. Предотвращение/смягчение последствий потоков и наводнений.
 - 3.3. Биоремедиация, контроль пестицидов и патогенных микроорганизмов.
 - 3.4. Энергетический круговорот (переработка и разложение отходов, загрязнений органическими и неорганическими поллютантами).
 - 3.5. Регулирование качества воды.
 - 3.6. Хранение и секвестрация углерода.
 - 3.7. Регулирование макро- и микроклимата.
 - 3.8. Контроль эрозии и осадконакопления.
 - 3.9. Регулирование качества воздуха и газообмена.
 - 3.10. Пополнение запаса грунтовых вод.
 - 3.11. Смягчение последствий засухи.
4. Культурные сервисы:
 - 4.1. Культурная история, самобытность и наследие.
 - 4.2. Эстетика, духовность, религия, вдохновение.
 - 4.3. Чувство места (осознание локальной идентичности на основе жизненного пространства).
 - 4.4. Образование и научные исследования.
 - 4.5. Рекреация, экотуризм и ментальное здоровье.

Данный перечень сервисов городских почв не является идеальным (Данный список является наиболее собирательным перечнем сервисов, выполняемых городскими почвами, согласно исследованиям, опубликованных в научных журналах и монографиях. При этом он может быть усовершенствован и доработан.) Многие сервисы пересекаются и тесно связаны друг с другом. Например, такие как: 3.1. Контроль поверхностного стока, дренаж и буфер, 3.2. Предотвращение/смягчение последствий потоков и наводнений, 3.8. Контроль эрозии и осадконакопления, 1.2. Круговорот воды, 2.1. Чистая питьевая вода (поверхностных и подземных источников) и т.д. Само разделение сервисов на группы также может быть подвергнуто критике. Но этот список является одной из хороших начальных точек для его развития и усовершенствования.

СВОЙСТВА, ФУНКЦИИ И СЕРВИСЫ ПОЧВ

При рассмотрении функций почв в экосистемах и биосфере, авторы [4] трактовали их как роль и значение почв и почвенных процессов в жизнедеятельности указанных объектов, их поддержании и эволюции. Реализацию экологических функций почв определяют почвенные свойства и характеристики, их оптимальные значения позволяют почвам наиболее эффективно выполнять свои функции. В работе [49] представлен обширный литературный обзор почвенных сервисов и концепция их интеграции с почвенными функциями и свойствами почв. Отмечается сложная взаимосвязь как почвенных функций и процессов между собой, так и конкретного почвенного свойства с сервисами. Например, сложно определить вклад и дать однозначную оценку такому свойству как объемная плотность почв для реализации круговорота воды или для плодородия. Автором [49] разработана концепция, связывающая запасы природного (в том числе почвенного) «капитала», который определяется статическими (уклон, экспозиция, подстилающие породы, каменистость) и динамическими характеристиками (рН, содержание углерода, температура почвы, растительность и характер наземного покрова), с реализацией экосистемных сервисов, которые направлены на обеспечение потребностей человека. Интеграция концепций экосистемных сервисов и экологических функций также рассмотрена в работе [22], где описана взаимосвязь почвенных свойств и их сервисов через почвенные функции. Согласно [91] свойства почвы, как сложной системы, могут быть сгруппированы в разных вариантах для одновременной оценки разных сервисов на различных уровнях.

Концептуальное описание схем интеграции почвенных свойств, их экологических функций и сервисов представлено в исследованиях о направлении устойчивого планирования городских и сельскохозяйственных территорий [27, 54, 55, 62, 87, 102] (рис. 1). Влияние отдельных свойств на реализацию различных экосистемных сервисов в городской среде рассмотрено в исследованиях [1, 75, 86, 98]. Прогностическое моделирование экосистемных сервисов на основе почвенных индикаторов в условиях изменчивых внешних условий приводится в работах [37].

В схеме экономического анализа природного капитала денежная оценка экосистемных сервисов считается вершиной последовательных этапов исследования. Экономической оценке предшествуют: перечисление всего спектра экосистемных сервисов, их качественный и количественный обзор [102]. Это справедливо и для экономической оценки (исправлено в предложении выше) сервисов городских почв. Однако для качественной экономической оценки [81] в настоящее время

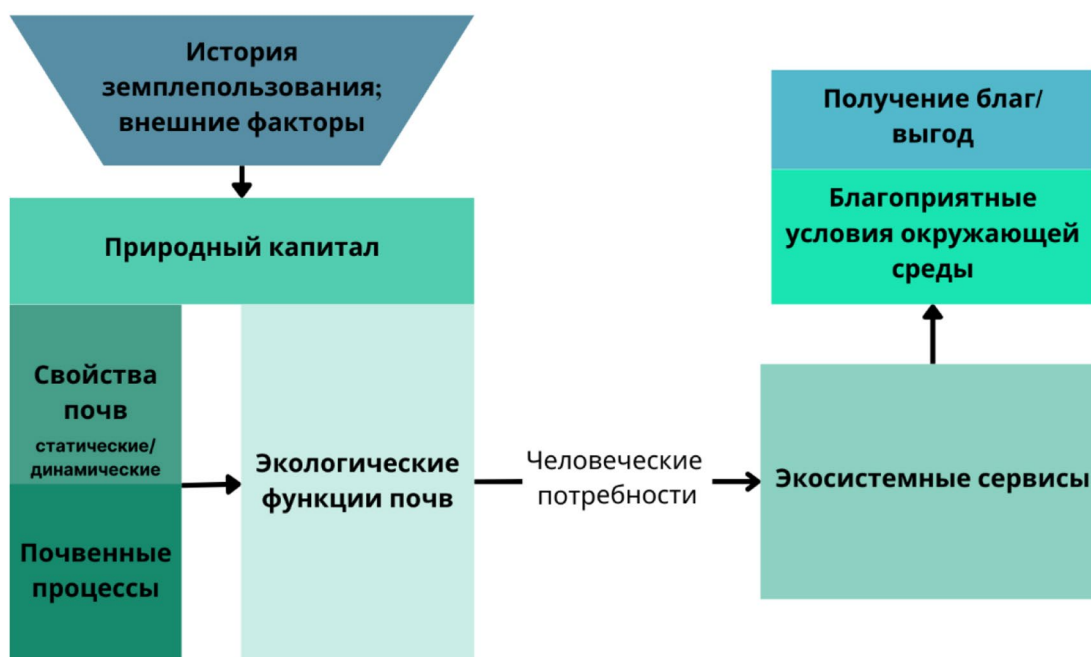


Рис. 1. Концептуальная схема связи почвенных характеристик и функций с сервисами (по [22, 55, 91]).

существует нехватка информации о свойствах и характеристиках городских почв, для понимания их взаимосвязи с экосистемными сервисами, которые в последствии могут быть переведены в денежный эквивалент.

Вероятно, экономическая оценка сервисов почв затруднена не только из-за нехватки информации о почвенных свойствах, а в силу малой проработанности связей на каждом этапе каскадного перехода. Сложная организация почв и их пространственная неоднородность затрудняют передачу информации о почвах в систему принятия управленческих решений.

ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СЕРВИСОВ ПОЧВ

До 90-х гг. XX в. качество почвы рассматривалось преимущественно с точки зрения обеспечения устойчивого роста сельскохозяйственных культур, в 1970–1990-х гг. основное внимание уделялось продуктивности почв, в 1990–2000-х гг. изучение качества почв приобрело более комплексный характер, почвы исследовались как компонент окружающей среды, имеющий взаимосвязи с другими компонентами, в 2010-х гг. начали появляться мультифункциональные исследования, работы об экосистемных сервисах [34]. Такая эволюция подходов может быть связана с получением новых знаний об окружающей среде, лучшим пониманием механизмов реализации экологических функций и отчасти эволюцией отношения человека к

проблеме устойчивости экосистем. Оценка природных компонентов подразумевает назначение им определенного веса в рамках системы ценностей человека. Принятая обществом система ценностей может видоизменяться, балансируя между антропоцентризмом и биоцентризмом, а также может отличаться в разных культурах и религиях. IPBES в своей классификации ЭС [47, 82] выделяет следующие типы ценности природных товаров и услуг: антропоцентрическую (инструментальную и реляционную) и неантропоцентрическую (внутреннюю). Инструментальной ценностью характеризуется какое-либо средство, которое служит для достижения определенной цели, реляционная ценность существует в контексте отношений между человеком и обществом, отношений людей с природой и различными аспектами мира. Неантропоцентрическая или внутренняя ценность представляет собой ценность, которой обладает объект или явление независимо от человеческой оценки [82]. Экономическая теория основана в значительной степени на антропоцентрическом внешнем взгляде, тогда как биоцентрический подход приводит доводы в пользу внутренней ценности природы и того, что она или ее части уже имеют моральный статус сами по себе. Концепция экосистемных сервисов балансирует на компромиссных подходах оценки экосистем путем назначения им денежных эквивалентов одновременно с признанием значимости сложных природных процессов, являющихся основой не только человеческих благ и благополучия, но и устойчивости экосистем.

В работе [20] рассматривается несколько видов оценки почв и земель: 1) экологическая оценка почв и земель (сопоставление соответствия существующего состояния почв с экологической нормой), 2) оценка природно-хозяйственной значимости (определение бонитета, определение биопродуктивности почв на основании оценки их плодородия); 3) эколого-бонитировочная оценка (оценка бонитета с учетом экологического состояния); 4) экономическая оценка (определение общественной полезности земли т.е. ее вклада в человеческое благополучие); 5) эколого-экономическая оценка (экономическая оценка с учетом экологического состояния) [18]. С помощью концепции экосистемных сервисов оценка городских почв и земель может производиться по экономическому сценарию — для расчета инвестиционных программ, сметных расчетов градостроительных проектов и демонстрации экономической выгоды тех или иных решений [20, 103], а также оценка может быть произведена по эколого-экономическому сценарию — путем анализа максимального набора потенциальных экосистемных сервисов на исходном участке, которые в различной степени будут способствовать благополучию человека в городе, приведении их к денежному эквиваленту [28, 55].

Зачастую оценка экосистемных сервисов является попыткой измерить неизмеримое, так как не все экологические функции, в том числе почвенные, могут быть монетизированы [28]. Однако в урбанизированной среде в силу специфики градостроительной деятельности многие сервисы находят денежный эквивалент. Например, санация почвы, вывоз опасных грунтов, подсыпка плодородного слоя являются процедурами, которые поддаются экономическому учету. В исследовании [28] авторы определяют качество отдельных выделов почвенного покрова на предмет способности предоставлять экосистемные сервисы помощью программного пакета DESTISOL. Этапы исследования предполагают выделение репрезентативных почвенных индикаторов (например, гранулометрический состав, pH), определение однородных участков, балльный расчет продуцирующих экологических функций и расчет потенциала выполнения экосистемных функций с учетом характера поверхности (склон, эрозия, растительный покров). Данная схема позволяет выявить пространственную неоднородность предоставляемых почвами сервисов, однако в работе не предоставлен обзор порядка учета и веса почвенных индикаторов и характеристик поверхности в анализе почвенных функций и сервисов. На этапе рассмотрения почвенных характеристик [55] отмечается необходимость учета истории землепользования и современного характера использования территории. Однако при

недостатке фондовых материалов не всегда есть возможность анализа истории землепользования. В исследовании [11] проводится экономическая оценка экосистемных сервисов для различных городских ландшафтов (парково-рекреационного, селитебного и селитебно-транспортного), в том числе на основании экологических функций почв, реализуемых за счет определенных почвенных свойств.

Несмотря на существующее понимание сопряженности концепций почвенных экологических функций и экосистемных сервисов естественных почв [22, 49], связи функций и сервисов городских почв до сих пор малоизучены [25]. Зачастую неизвестно, в какой степени те или иные почвенные свойства влияют на реализацию различных почвенных сервисов. В работе [107] описана каскадную модель для оценки сервисов городских и техногенных почв и продемонстрирована возможность ее применения на основании конкретных индикаторов. Отмечается [42], что иногда при построении каскадного перехода функций к сервисам происходит упрощение реальных взаимосвязей природных процессов и одновременно усложнение самого определения экосистемных сервисов. Зачастую в линейных каскадах происходит расчет от конкретных процессов к только той выгоде, которой люди придают ценность, вследствие чего часть сервисов остается без внимания, что ведет к утрате комплексного подхода к изучению многофункциональных систем.

Методы монетизации сервисов почв рассматриваются в статьях [7, 11, 21, 40, 41, 67, 107]. В рамках программы UNEP-TEEB и проекта ESMERALDA [30], разработана классификация, выделяющая первичные методы экономической оценки экосистемных сервисов и методы трансфера стоимости. Первичные методы приводят разнообразие природных характеристик к денежному эквиваленту. Однако эти методы требуют значительных временных и экономических затрат на получение данных. Ко второй группе относятся методы трансфера (передачи) стоимости (value transfer methods), которые позволяют использовать накопленную информацию на исследованных участках (с помощью первичных методов), в отношении участков, которые требуют решения задач управленческих решений. Использование этих методов снижает денежные и временные затраты, но применимо только для хорошо изученных участков (с помощью первичных методов). В работах [2, 8] указаны алгоритмы и подходы экономической оценки экосистемных сервисов в условиях городов.

Таким образом, существует опыт различных подходов к оценке ЭС, среди них есть методики оценки именно почвенных сервисов, применяемые на практике. Однако до сих пор оценка сервисов почв носит локально-региональный характер,

набор сервисов и методик их изучения всегда зависит от узких научных или хозяйственных целей конкретного исследования.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ГОРОДСКИХ ПОЧВ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИХ ФУНКЦИЙ И СЕРВИСОВ

Концепция функций и сервисов почв может являться основой для оценки качества городских почв. Основная идея подобных подходов заключается в том, что качество городских почв определяется их способностью предоставлять сервисы, важные для поддержания экологической устойчивости города. Поэтому, чем лучше почвы могут предоставлять такие сервисы, тем более ценны они для города и его обитателей. Оценке по этому подходу могут подлежать и техногенные поверхностные образования, которые выделяются в современной классификации почв России [5], например, реплантоземы, конструктороземы [14], при условии соответствия каскадному принципу (свойство—функция—сервис) [66].

На концепциях почвенных экосистемных функций и сервисов базируются, например, такие методы индексной оценки качества городской среды, как the BOKS (bodenkonzept stuttgart) [111], the SQUID (soil quality indicator) [47, 48], различные варианты собственно uSQI (urban soil quality index) [97, 78, 57, 65]. Данные индексы позволяют производить бонитировку городских почв в зависимости от величины неких почвенных индикаторов. Изначально, индекс качества почвы (SQI) предполагал рассмотрение трех почвенных функций: а) обеспечение круговорота воды (фильтрация, хранение, источник), б) пул питательных веществ и обеспечение их круговорота, в) обеспечение устойчивой биологической активности [69]. На основе принципа расчета индекса качества почв в городе созданы модели CSHT (cornell soil health test) [95], ISEQE (improved soil environmental quality evaluation) [31, 97]. В рамках территориального планирования используется ряд моделей, позволяющих производить оценку экосистемных сервисов и их стоимости, такие как InVEST (integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs), FUTURES (future urban-regional environment simulation), ARIES (artificial intellect for ecosystem services), FLUS (future land use simulation) [109, 110, 112, 113]. Среди подобных моделей InVEST является наиболее часто используемой моделью для комплексной оценки сервисов городских почв [99]. Данная модель позволяет рассчитывать сценарии удержания городских ливневых вод, снижения риска наводнений, смягчения воздействия городского острова тепла, динамику запасов углерода и др. [64, 68, 93, 100] с учетом конкретных почвенных характеристик.

В некоторых городах на протяжении последних десятилетий производится внедрение концепции экосистемных сервисов на законодательном уровне [23, 27, 59, 77, 99, 102]. Согласно [42], в Штутгарте (Германия) в основу градостроительной деятельности положен индекс качества почвы, основанный на оценке способности почвы поддерживать экологические функции и сервисы. В Дрездене (Германия) в плане развития заложена норма в 40% городских земель, которые будут отводиться под застройку и инфраструктуру, в то время как остальная площадь отводится для незапечатанных почв в целях обеспечения реализации почвами их важных для города функций и сервисов. В Берлине с 2004 г. принят закон о применении различных мер мелиорации для защиты почв от переуплотнения. В Онтарио (Канада) в 12 из 13 городских планов, обозначены те или иные сервисы почв, которые они могут предоставлять [72]. Однако отмечается, что в официальных планах чаще указываются потенциальные сервисы, без учета реальных условий землепользования и состояния природных компонентов. В Москве в 2007 г. принят закон “О городских почвах”, в котором прописана необходимость сохранения экологических функций городских почв, но не указаны конкретные меры их защиты и определяющие показатели, не обозначена необходимость учета сервисов городских почв, а также методика их оценки. В материалах развития города Москвы (Генеральный план развития г. Москвы до 2035 г.) указывается на необходимость создания единой системы управления качеством городских почв на базе оценки их экологического состояния, что позволило бы эффективно решать вопросы размещения объектов застройки и инфраструктуры. В России в настоящее время не учитываются функции и сервисы городских почв при создании генеральных и мастер планов в городах [15, 19].

В городской среде при интенсивной антропогенной нагрузке на почвы все более актуальным становится антропоцентрический подход к их оценке. С точки зрения концепции экосистемных сервисов, почвы являются важнейшим источником благ и услуг для человека, экономическая выгода от которых в свою очередь стимулирует принимать решения по выявлению и обеспечению реализации почвенных сервисов. Оценку почвенных сервисов в масштабе стран проводят лишь в некоторых регионах или конкретных научных и хозяйственных градостроительных исследованиях, что вероятно связано с отсутствием нормативного закрепления подобных методик и затруднениями при интеграции почвенной информации в общую систему ЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение городских почв, их экологического состояния и качества является актуальным и развивающимся направлением. В процессе хозяйственной деятельности в городе почвы часто остаются без внимания, их оценка проводится исключительно по отдельным параметрам (агрохимическим, санитарно-химическим и др.), которые часто не имеют отношения к поддержанию и сохранению функций почв, важных именно для городской среды. Научные исследования по почвам городов последние два десятилетия обширны [9, 10, 71, 80, 83], работ по классификации и свойствам городских почв достаточно много, но с точки зрения рассмотрения именно сервисов городских почв их явно недостаточно.

Базовые понятия концепции экосистемных сервисов претерпевают изменения, но основной принцип приведения экологической информации в сферу принятия управленческих решений по почвенным ресурсам в городе остается определяющим. При этом оценка вклада именно почв в оценку экосистемных сервисов имеет важное теоретическое и практическое значение.

Использование концепции сервисов почв предоставляет возможность оценить качество городских почв с целью его учета при планировании градостроительной деятельности. В настоящее время активно исследуются механизмы интеграции и каскадные модели перехода от конкретных почвенных характеристик к сервисам почв, однако все еще отсутствуют методики комплексного учета почвенных свойств и процессов реализации экологических функций городских почв и корреляции почвенных сервисов между собой.

С помощью концепции сервисов, предоставляемых городскими почвами, может производиться выработка как локальных наиболее выгодных управленческих решений, так и более масштабное городское планирование. В настоящее время проводятся исследования по созданию прогностических моделей влияния городских почв на предотвращение наводнений, секвестрацию углерода, смягчение городских температурных аномалий [73]. Разработаны модели комплексного учета потенциальных экосистемных сервисов для отдельных участков [28, 55]. Применяются каскадные модели анализа экосистемных сервисов от конкретных почвенных свойств к принятию управленческих решений [107]. Однако по-прежнему существует нехватка первичной информации о городском почвенном покрове, его свойствах и характеристиках, механизмах реализации экологических функций почв, на основе которых должна строиться оценка почвенных сервисов. Стоит отметить, что с точки зрения получения экологической информации для применения методов первичной оценки сервисов

почв, городские территории имеют преимущество за счет доступности непосредственно предмета исследования, наличия таких базовых хозяйственных процедур, как подсыпка плодородного слоя грунта, утилизация загрязненных почв и грунтов, имеют определенную денежную стоимость, что упрощает экономическую оценку экосистемных сервисов.

Концепция экосистемных (в том числе почвенных) сервисов находит применение в нормативных градостроительных документах, регламентируя стратегию развития городов в развитых странах мира. Однако в России в настоящий момент существуют лишь единичные примеры вовлечения почвенной информации в систему управленческих решений (в основном это экспериментальные научные исследования), в то время как основная номенклатурная база не включает в себя методики и возможности учета концепций экосистемных сервисов в процессе градостроительной деятельности. Комплексная экологическая оценка на всех этапах взаимодействия с почвенными ресурсами в городской среде может способствовать устойчивому развитию малых и больших городов России, а также принятию решений по устойчивому планированию новых.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российской Федерации (соглашение с Минобрнауки России № 075-15-2022-321 от 21 апреля 2022 г.).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ананьева Н.Д., Иващенко К.В., Сушко С.В.* Микробные показатели городских почв и их роль в оценке экосистемных сервисов (обзор) // Почвоведение. 2021. № 21. С. 1231–1246. <https://doi.org/10.31857/s0032180x21100038>
2. *Бобылев С.Н.* Подходы к оценке экосистемных услуг на уровне города и механизмы платежей // Бюл. “На пути к устойчивому развитию России”. 2014. № 70. С. 3–12.
3. Демографический ежегодник России. М., 2021. 256 с.
4. *Добровольский Г.В., Никитин Е.Д.* Функции почв в биосфере и экосистемах. М.: Наука, 1990. 270 с.
5. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
6. *Конюшков Д.Е.* Формирование и развитие концепции экосистемных услуг: обзор зарубежных

- публикаций // Бюл. Почв. ин-та. 2015. Вып. 80. С. 26–49.
<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2015-80-26-49>
7. Макаров О.А., Цветнов Е.В., Абдулханова Д.Р. История, современное состояние и перспективы развития экономической оценки почв в России (обзор) // Вестник Моск. Ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2023. Т. 18. № 2. С. 26–34.
 8. Медведева О.Е. Алгоритм стоимостной оценки экосистемных услуг природных территорий города Москвы // Бюл. “На пути к устойчивому развитию России”. 2014. № 70. С. 13–32.
 9. Почва, город, экология М., 1997. 320 с.
 10. Прокофьева Т. В., Герасимова М. И., Безуглова О.С., Бахматова К.А., Гольева А.А., Горбов С.Н., Жарикова Е.А. и др. Введение почв и почвоподобных образований городских территорий в классификацию почв // Почвоведение. 2014. № 10. С. 1155–1164.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X14100104>
 11. Семенюк О.В., Стома Г.В., Бодрова К.С. Оценка стоимости экосистемных услуг городских ландшафтов (на примере г. Москвы) // Почвоведение. 2021. № 12. С. 1535–1548.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X21120108>
 12. Смагин А.В., Азовцева Н.А., Смагина М.В., Степанов А.Л. Некоторые критерии и методы оценки экологического состояния почв в связи с озеленением городских территорий // Почвоведение. 2006. № 5. С. 603–615.
 13. Смагин А.В. Городские почвы // Природа. 2010. № 7. С. 15–24.
 14. Строганова М.Н., Мягкова А.Д., Прокофьева Т.В. Роль почв в городе // Почвоведение. 1997. № 1. С. 96–101.
 15. Федеральный закон “Градостроительный кодекс Российской Федерации” от 29.12.2004 № 190-ФЗ.
 16. Цветнов Е.В., Макаров О.А., Григорян К.Л., Красильникова В.С. Оценка экосистемных услуг земель историко-культурного назначения (на примере музея-усадьбы Л.Н. Толстого “Ясная Поляна”) // Вест. Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2018. № 4. С. 47–53.
 17. Цели устойчивого развития в Российской Федерации. М., 2022. 87 с.
 18. Шоба С.А., Яковлев Н.Г., Рыбальский Н.Г. Экологическое нормирование и управление качеством почв и земель. М.: НИА-Природа, 2013. 310 с.
 19. Экосистемные услуги России: Прототип национального доклада. Т. 3. Зеленая инфраструктура и экосистемные услуги крупнейших городов России. М.: Изд-во Центра охраны дикой природы, 2021. 112 с.
 20. Яковлев А.С., Макаров О.А., Киселев С.В., Молчанов Э.Н. Эколого-экономическая оценка деградации земель. М.: МАКС Пресс, 2016. 252 с.
 21. Abakumov E., Suleymanov A., Guзов Y., Titov V. Vashuk A., Shestakova E., Fedorova I. Ecosystem services of the cryogenic environments: identification, evaluation and monetisation – A review // J. Water Land Dev. 2022. V. 52. P. 1–8.
<https://doi.org/10.24425/jwld.2021.139937>
 22. Adhikari K., Hartemink A.E. Linking soils to ecosystem services – A global review // Geoderma. 2016. V. 262. P. 101–111.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>
 23. Babi Almenar J., Rugani B., Geneletti D., Brewer T. Integration of ecosystem services into a conceptual spatial planning framework based on a landscape ecology perspective // Landscape Ecology. 2018. V. 33. P. 2047–2059.
<https://doi.org/10.1007/s10980-018-0727-8>
 24. Band L., Cadenasso M., Grimmond C., Grove M., Pickett S.T.A. Heterogeneity in urban ecosystems: patterns and process. ecosystem function in heterogeneous landscapes // Ecosystem Function in Heterogeneous Landscapes. 2005. P. 257–278.
https://doi.org/10.1007/0-387-24091-8_13
 25. Bartkowski B., Bartke S., Helming K., Paul C., Tehen A.-K., Hansjürgens B. Potential of the economic valuation of soil-based ecosystem services to inform sustainable soil management and policy // PeerJ. 2020. V. 8. P. e8749.
<https://doi.org/10.7717/peerj.8749>
 26. Baveye Ph., Baveye J., Gowdy J. Soil “Ecosystem” Services and Natural Capital: Critical Appraisal of Research on Uncertain Ground // Front. Environ. Sci. 2016. V. 4. P. 41.
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00041>
 27. Blanchart A., Consalès J.-N., Séré G., Schwartz C. Consideration of soil in urban planning documents – a French case study // JSS. 2019. V. 19. P. 3235–3244.
<https://doi.org/10.1007/s11368-018-2028-x>
 28. Blanchart A., Séré G., Cherel J., Warot G., Stas M., Consalès J.-N., Morel J.-L., Schwartz C. Towards an operational methodology to optimize ecosystem services provided by urban soils // Landsc Urban Plan. 2018. V. 176. P. 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.03.019>
 29. Blum W.E.H. Soil Protection concept of the Council of Europe and integrated soil research // Soil Environ. 1993. V. 1. P. 37–47.
https://doi.org/10.1007/978-94-011-2008-1_5
 30. Bongaarts J. IPBES, 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Population and Development Review. 2019. 22 p.
<https://doi.org/10.1111/padr.12283>
 31. Borgogno Mondino E., Fabietti G., Ajmone Marsan F. Soil quality and landscape metrics as driving factors in

- a multi-criteria GIS procedure for peri-urban land use planning // *UFUG*. 2015. V. 14. № 4. P. 743–750. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.07.004>
32. *Brander L.M.* Guidance manual on value transfer methods for ecosystem services. United Nations Environment Programme. Nairobi, Kenya: UNON, 2013. 77 p.
 33. *Brander L., Van Beukering P.J.H., Balzan M., Broekx S., Liekens I., Marta-Pedroso C., Szkop Z.* Report on Economic Mapping and Assessment Methods for Ecosystem Services Deliverable D3.2 // EU Horizon 2020 ESERALDA Project, Grant agreement. 2018. 67 p.
 34. *Bünemann E. K., Bongiorno G., Bai Zh., Creamer R., Deyn G.B., de Goede R., Fleskens L., et al.* Soil quality – A critical review // *Soil Biol. Biochem.* 2018. V. 120. P. 105–125. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
 35. *Calzolari C., Tarocco P., Lombardo N., Marchi N., Ungaro F.* Assessing soil ecosystem services in urban and peri-urban areas: from urban soils survey to providing support tool for urban planning // *Land Use Policy*. 2020. V. 99. P. 105037. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105037>
 36. *Cecchi C.* Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities. Final report of the Horizon 2020 expert group on nature-based solutions and re-naturing cities. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2015. 75 p. <https://doi.org/10.2777/479582>
 37. *Chapman E.J., Small G.E., Shrestha P.* Investigating potential hydrological ecosystem services in urban gardens through soil amendment experiments and hydrologic models // *Urban Ecosyst.* 2022. V. 25. P. 867–878. <https://doi.org/10.1007/s11252-021-01191-7>
 38. *Chu N., Zhang P., Wu X.* Spatiotemporal evolution characteristics of urbanization and its coupling coordination degree in Russia – perspectives from the population, economy, society, and eco-environment // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2022. V. 29. P. 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20215-z>
 39. *Costanza R., d'Are R., de Groot R., Farber S., Grasso M., Hannon B., Limburg K. et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital // *Nature*. 1997. V. 387. P. 253–260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>
 40. *Costanza R.* Valuing natural capital and ecosystem services toward the goals of efficiency, fairness, and sustainability // *Ecosyst. Serv.* 2020. V. 43. P. 101096. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101096>
 41. *Costanza R., Groot R., Braat L., Fioramonti L., Sutton P., Farber S., Grasso M.* Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? // *Ecosyst. Serv.* 2016. V. 28. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008>
 42. *Cortinovis C., Geneletti D.* Ecosystem services in urban plans: What is there, and what is still needed for better decisions // *Land Use Policy*. V. 70. P. 298–312. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.10.017>
 43. *Delibaş M., Tezer A., Kuzniecowa Bacchin T.* Towards embedding soil ecosystem services in spatial planning // *Cities*. 2021. V. 113. P. 103150. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103150>
 44. *DeWitt T., Berry W., Canfield T., Fulford R., Harwell M., Hoffman J., Johnston J.* The Final Ecosystem Goods & Services (FEGS) Approach: A Beneficiary-Centric Method to Support Ecosystem-Based Management / Ecosystem-Based Management, Ecosystem Services and Aquatic Biodiversity / Eds. O'Higgins T.G. et al. Springer, 2020. P. 127–145. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45843-0_7
 45. *Díaz S., Demissew S., Carabias J., Joly C., Lonsdale M., Ash N.* The IPBES conceptual framework – connecting nature and people // *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 2015. V. 14. P. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.11.002>
 46. *Drobnik T., Schwaab J., Grêt-Regamey A.* Moving towards integrating soil into spatial planning: No net loss of soil-based ecosystem services // *J. Environ. Manage.* 2020. V. 263. P. 110406. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110406>
 47. *Drobnik T., Greiner L., Keller A., Grêt-Regamey A.* Soil quality indicators – from soil functions to ecosystem services // *Ecol. Indic.* 2018. V. 94. P. 151–169. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.052>
 48. *Dominati E., Patterson M., Mackay A.* A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils // *Ecol. Econ.* 2010. V. 69. P. 1858–1868. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002>
 49. *Dominati E.* Natural capital and ecosystem services of soils // *Ecosystem services in New Zealand – conditions and trends*. 2013. 11 p.
 50. *Dominati E., Robinson D.A., Marchant S.C., Bristow K.L., Mackay A.D.* Natural Capital, Ecological Infrastructure, and Ecosystem Services in Agroecosystems. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*. 2014. P. 245–264. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-52512-3.00243-6>
 51. *EEA Report.* Healthy environment, healthy lives: how the environment influences health and well-being in Europe. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020. 172 p.
 52. *Edmondson J.L., Davies Z.G., Mchugh N., Gaston K.J., Leake J.R.* Organic carbon hidden in urban ecosystems // *Sci. Rep.* 2012. V. 2. P. 963. <https://doi.org/10.1038/srep00963>
 53. *Egoh B., Drakou E., Dunbar M., Maes J., Willemsen L.* Indicators for mapping ecosystem services: a review. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012. 113 p. <https://doi.org/10.2788/41823>

54. *Foldal C., Leitgeb E., Michel K.* Characteristics and Functions of Urban Soils // Chapter in book: Soils in Urban Ecosystem. 2022. P. 25–45.
55. *Fossey M., Angers D., Bustany C., Cudennec Ch., Durand P., Gascuel-Oudou Ch., Jaffrezic A., et al.* A Framework to Consider Soil Ecosystem Services in Territorial Planning // *Front. Environ. Sci.* 2020. V. 8. P. 1–12. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00028>
56. *Gardi C., Florczyk A.J., Scalenghe R.* Outlook from the soil perspective of urban expansion and food security // *Heliyon*. 2021. V. 7. P. e05860. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05860>
57. *Gholamhosseinian A., Bashtia M.H., Sepeh, A.* Soil Quality: Concepts, Importance, Indicators, and Measurement // *Soils in Urban Ecosystem*. Springer, Singapore / Eds. Rakshit A. et al. 2022. P. 161–187. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8914-7_8
58. *Guilland C., Maron P.-A., Damas O., Ranjard L.* Biodiversity of urban soils for sustainable cities // *Environ. Chem. Lett.* 2018. V. 16. P. 1267–1282. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0751-6>
59. *Haase D., Larondelle N., Andersson E. et al.* A Quantitative Review of Urban Ecosystem Service Assessments: Concepts, Models, and Implementation // *AMBIO*. 2014. V. 43. P. 413–433. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0504-0>
60. *Haines-Young R., Potschin M.B.* Common international classification of ecosystem services (CICES) V5.1 and guidance on the application of the revised structure // *A Policy Brief. One Ecosystem*. V. 3. P. e27108. <https://doi.org/10.3897/oneeco.3.e27108>
61. *Haines-Young R., Potschin-Young M.* Revision of the Common International Classification for Ecosystem Services (CICES V5.1): A Policy Brief. // *One Ecosystem*. 2018. V. 3. P. e27108. <https://doi.org/10.3897/oneeco.3.e27108>
62. *Halecki W., Stachura T.* Evaluation of soil hydrophysical parameters along a semiurban small river: Soil ecosystem services for enhancing water retention in urban and suburban green areas // *Catena*. 2020. V. 196. P. 104910. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104910>
63. *Hasan S., Shi W., Zhu X.* Impact of land use land cover changes on ecosystem service value – A case study of Guangdong, Hong Kong, and Macao in South China // *PLoS ONE*. 2020. V. 15. P. e0231259. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0231259>
64. *He C., Zhang D., Huang Q., Zhao Y.* Assessing the potential impacts of urban expansion on regional carbon storage by linking the LUSD-urban and InVEST models // *Environ. Model Softw.* 2016. V. 75. P. 44–58. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2015.09.015>
65. *Hyun J., Kim Y. J., Yoo G.* A method for soil quality assessment in the metropolitan greenery: A comprehensive view of ecosystem services and soil functions // *MethodsX*. 2023. V. 10. P. 102102. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102102>
66. *Ivashchenko K., Lepore E., Vasenev V., Ananyeva N., Demina S., Khabibullina F., Vaseneva I., et al.* Assessing Soil-Like Materials for Ecosystem Services Provided by Constructed Technosols. *Land* 2021. V. 10. P. 1185. <https://doi.org/10.3390/land10111185>
67. *Jónsson J.O., Davíðsdótti B.R.* Classification and valuation of soil ecosystem services // *Agric. Syst.* 2016. V. 145. P. 24–38. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2016.02.010>
68. *Kadaverugu A., Rao Ch., Gorthi K.* Quantification of flood mitigation services by urban green spaces using InVEST model: a case study of Hyderabad city, India // *MESE*. 2021. V. 7. P. 589–602. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00937-0>
69. *Karlen D.L., Stott D.E.* A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality // *Defining soil quality for a sustainable environment*. The Soil Science Society of America, Inc. 1994. № 35. P. 53–72. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub35.c4>
70. *Keesstra S., Bouma J., Wallinga J., Tittone P.A., Smith Pete., Cerdà A., Montanarella L., et al.* FORUM paper: The significance of soils and soil science towards realization of the UN sustainable development goals (SDGs) // *SOIL Discuss.* V. 2. P. 111–128. <https://doi.org/10.5194/soil-2015-88>
71. *Kumar K., Hundal L.* Soil in the City: Sustainably Improving Urban Soils // *J. Environ. Qual.* 2016. V. 45. P. 2–8. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.11.0589>
72. *Lam S.T., Conway T.M.* Ecosystem services in urban land use planning policies: A case study of Ontario municipalities // *J. Land Use Sci.* 2018. V. 77. P. 641–651. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.06.020>
73. *Latawiec A., Rodrigues A., Korys K., Medeiros B.* Methodical Aspects of Soil Ecosystem Services Valuation // *J. Agric. Eng.* 2022. V. 26. P. 39–49. <https://doi.org/10.2478/agriceng-2022-0004>
74. *Li G. Sun G.-X., Ren Y., Luo X.-S.* Urban soil and human health: A review // *Eur. J. Soil Sci.* 2018. V. 69. P. 196–215. <https://doi.org/10.1111/ejss.12518>
75. *Lima A.C.R., Brussaard L., Totola M.R., Hoogmoed W.B., de Goede R.G.M.* A functional evaluation of three indicator sets for assessing soil quality // *Appl. Soil Ecol.* 2013. V. 64. P. 194–200. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.12.009>
76. *Liu R., Wang M.-E., Chen W.* The influence of urbanization on organic carbon sequestration and cycling in soils of Beijing // *Landsc. Urban Plan.* 2018. V. 169. P. 241–249. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.09.002>
77. *Louwagie G., Kibblewhite M., Morris J., Burghardt W., Hoeke S., Manning D., Gregersen J. et al.* Soil resource

- efficiency in urbanised areas – analytical framework and implications for governance // EEA report. 2016. V. 7. 95 p.
<https://doi.org/10.2800/020840>
78. *Mamehpour N., Rezapour S., Ghaemian N.* Quantitative assessment of soil quality indices for urban croplands in a calcareous semi-arid ecosystem // *Geoderma*. 2021. V. 382. P. 114781.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114781>
 79. MEA – Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: a framework for assessment. Washington DC: Island Press, 2003. 155 p.
 80. *Morel J.-L., Chenu C., Lorenz K.* Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs) // *J. Soils Sediments*. 2015. V. 15. P. 1659–1666.
<https://doi.org/10.1007/s11368-014-0926-0>
 81. *O’Riordan R., Davies J., Stevens C., Quinton J.N., Boyko C.* The ecosystem services of urban soils: a review // *Geoderma*. 2021. V. 395. P. 115076.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115076>
 82. *Pascual U., Balvanera P., Díaz S., Pataki G., Roth E., Stenseke M., Watson R. T. et al.* Valuing nature’s contributions to people: the IPBES approach // *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 2017. V. 26–27. P. 7–16.
<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2016.12.006>
 83. *Paul S., Rakshit A.* Classification and Functional Characteristics of Urban Soil // *Soils in Urban Ecosystem*. Springer, 2022.
https://doi.org/10.1007/978-981-16-8914-7_2
 84. *Pereira P., Bogunovic I., Munoz-Rojas M., Brevik E.C.* Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management // *Curr. Opin. Environ. Sci. Health*. 2018. V. 5. P. 7–13.
<https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.003>
 85. *Potschin-Young M., Haines-Young R., Görg C., Heink U., Jax K., Schleyer C.* Understanding the role of conceptual frameworks: Reading the ecosystem service cascade // *Ecosyst. Serv.* 2016. V. 29. P. 428–440.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.05.015>
 86. *Pouyat R., Szlavecz K., Yesilonis I., Groffman P., Schwarz K.* Chemical, physical and biological characteristics of urban soils // *Urban Ecosystem Ecology*. Agronomy Monograph 55. Madison, WI: American Society of Agronomy. 2010. P. 119–152.
<https://doi.org/10.2134/agronmonogr55.c7>
 87. *Pozza L.E., Field D.J.* The science of Soil Security and Food Security // *Soil Security*. 2020. V. 1. P. 100002.
<https://doi.org/10.1016/j.soisec.2020.100002>
 88. *Rate A. W.* Urban Soils / *Progress in Soil Science*: Springer, 2022. 451 p.
 89. *Rees F., Dagois R., Derrien D., Fiorelli J.-L., Watteau F., Morel J.-L., Schwartz C. et al.* Storage of carbon in constructed technosols: in situ monitoring over a decade // *Geoderma*. 2018. V. 337. P. 641–648.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.009>
 90. *Rinot O., Levy G.J., Steinberger Y., Svoray T., Eshel G.* Soil health assessment: a critical review of current methodologies and a proposed new approach // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 648. P. 1484–1491.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.259>
 91. *Robinson D., Fraser I., Dominati E., Davidsdottir B., Jónsson J., Jones L., Jones S., et al.* On the Value of Soil Resources in the Context of Natural Capital and Ecosystem Service Delivery // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2014. V. 78. P. 685–700.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2014.01.0017.5>
 92. *Rodríguez-Espinoza T., Navarro-Pedreño J., Gómez Lucas I., Manuel Miguel J., Bech-Borras J., Zorpas A.* Urban areas, human health and technosols for the green deal // *Environ. Geochem. Health*. 2021. V. 43. P. 5065–5086.
<https://doi.org/10.1007/s10653-021-00953-8>
 93. *Ronchi S., Salata S., Arcidiacono A.* Which urban design parameters provide climate-proof cities? An application of the Urban Cooling InVEST Model in the city of Milan comparing historical planning morphologies // *Sustain. Cities Soc.* 2020. V. 63. P. 102459.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102459>
 94. *Sapkota M., Young J., Coldren C., Slaughter L., Longing S.* Soil physiochemical properties and carbon sequestration of Urban landscapes in Lubbock, TX, USA // *Urban For. Urban Green*. 2020. V. 56. P. 126847.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126847>
 95. *Schindelbeck R. R., van Es H. M., Abawi G. S., Wolfe D. W., Whitlow T. W., Gugino B. K., Idowu O. J., Moebius-Clune B. N.* Comprehensive assessment of soil quality for landscape and urban management // *Landsc. Urban Plan.* 2008. V. 88. № 2–4. P. 73–80.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.08.006>
 96. *Shen J., Li S., Liang Z., Liu L., Li D., Wu S.* Exploring the heterogeneity and nonlinearity of trade-offs and synergies among ecosystem services bundles in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration // *Ecosyst. Serv.* 2020. V. 43. 15 pp.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101103>
 97. *Sefati Z., Khalilimoghadam B., Nadian H.* Assessing urban soil quality by improving the method for soil environmental quality evaluation in a saline groundwater area of Iran // *Catena*. 2019. V. 173. P. 471–480.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.040>

98. *Stumpe B., Bechtel B., Heil J., Jörges Ch., Jostmeier A., Kalks F., Schwarz K., et al.* Soil texture mediates the surface cooling effect of urban and peri-urban green spaces during a drought period in the city area of Hamburg // *Sci. Total Environ.* 2023. V. 897. 19 p. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165228>
99. *Tan J., Peng L., Wu W., Huang Q.* Mapping the evolution patterns of urbanization, ecosystem service supply–demand, and human well-being: A tree-like landscape perspective // *Ecol. Indic.* 2023. V. 154. P. 110591. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110591>
100. *Tang Y., Gao Ch., Wu F.-Y.* Urban Ecological Corridor Network Construction: An Integration of the Least Cost Path Model and the InVEST Model // *ISPRS Int. J. Geoinf.* 2020. V. 9. № 33. P. 9010033. <https://doi.org/10.3390/ijgi9010033>
101. TEEB The Economics of Ecosystems and Biodiversity Mainstreaming the Economics of Nature: A synthesis of the approach, conclusions and recommendations of TEEB. Malta: Progress Press, 2010. 39 p.
102. *Teixeira da Silva R., Fleskens L., van Delden H.* Incorporating soil ecosystem services into urban planning: status, challenges and opportunities // *Landsc. Ecol.* 2018. V. 33. P. 1087–1102. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0652-x>
103. *Tresch S., Moretti M., Le Bayon R.-C., Mäder P., Zanetta A., Frey D. A.* Gardener's influence on urban soil quality // *Front. Environ. Sci.* 2018. V. 6. P. 25. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00025>
104. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects 2019. N.Y.: United Nations, 2019. 47 p.
105. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420). New York: United Nations, 2019. 38 p.
106. United Nations. System of Environmental-Economic Accounting – Ecosystem Accounting (SEEA EA). N.Y.: United Nations, 2021. 393 p.
107. *Vasenev V., van Oudenhoven A., Romzaykina O., Haggiaghaeva R.* The ecological functions and ecosystem services of urban and technogenic soils: from theory to practice (a review) // *Eurasian Soil Sci.* 2018. V. 51. P. 1119–1132. <https://doi.org/10.1134/S1064229318100137>
108. *Vasenev V., Varentsov M., Konstantinov P.* Projecting urban heat island effect on the spatial-temporal variation of microbial respiration in urban soils of Moscow megalopolis // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 768. P. 147457. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147457>
109. *Wang Ch., Wang X., Wang Y., Zhan J., Chu X., Teng Y., Wei L. et al.* Spatio-temporal analysis of human well-being and its coupling relationship with ecosystem services in Shandong province, China // *J. Geogr. Sci.* 2023. V. 33. P. 392–412. <https://doi.org/10.1007/s11442-023-2088-8>
110. *Wang R., Xu R., Bai Y., Alatalo J., Yang Z., Yang W., Yang Z.* Impacts of Urban Land Use Changes on Ecosystem Services in Dianchi Lake Basin // *Sustain. Sci.* 2021. V. 13. P. 4813. <https://doi.org/10.3390/su13094813>
111. *Wolff G.* Das Bodenschutzkonzept Stuttgart (BOKS). Stuttgart: Amt für Umweltschutz, 2006. 72 p.
112. *Qiao X., Li Z., Lin J., Wang H., Zheng S., Yang S.* Assessing current and future soil erosion under changing land use based on InVEST and FLUS models in the Yihe River Basin, North China // *Int. Soil Water Conserv. Res.* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.07.001>
113. *Ye H., Sun C., Wang K., Zhang G.-Q., Lin T., Yan H.* The role of urban function on road soil respiration responses // *Ecol. Indic.* 2018. V. 85. P. 271–275. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.10.004>
114. *Zhang Z., Shen Z., Liu L., Zhang Y., Yu C., Cui L., Gao Y.* Integrating ecosystem services conservation into the optimization of urban planning policies in eco-fragile areas: A scenario-based case study // *Cities.* 2023. V. 134. P. 1668. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104200>

Ecosystem Services Provided by Urban Soils and Their Assessment: a Review

K. S. Orlova^{1,*} and I. Yu. Savin^{1,2}

¹Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia

²Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, 115095 Russia

**e-mail: orlkse@yandex.ru*

The history of the development of the concept of urban soil services, their current list, anthropocentric and pedocentric approaches to their assessment, and experience of application in various cities are considered. At present, the concept of ecosystem services is a comprehensive tool that allows, by analogy, to translate soil information into the sphere of management decision-making, as well as to maintain the sustainability of urban ecosystems by introducing measures to preserve urban soil services. Despite the accumulated experience in methods for assessing ecosystem services and examples of their application in urban planning in individual cities, there is no unified approach to assessing the services of urban soils. The widespread application of this concept is often hampered by insufficient knowledge of the properties of urban soils with their high spatiotemporal variability, as well as by the insufficient development of the approach itself for assessing soil services. However, the active development of theoretical and practical approaches to integrating information about soil characteristics into management is a prerequisite for optimizing the system of soil resource management in cities and towns.

Keywords: urban ecology, environmental quality, ecosystem management, soil resources