

УДК 631.417

DOI: 10.18522/2308-9709-2025-53-3

Исследование содержания и запасов углерода в почвах запечатанных территорий ядра Ростовской агломерации

Скрипников П.Н.¹, Горбов С.Н.¹, Сальник Н.В.¹, Тагивердиев С.С.¹,
Меженков А.А.¹, Безуглова О.С.¹,

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия,
skripnikov@sfnedu.ru

В статье представлены результаты исследования и расчета запасов органического углерода почв на запечатанных территориях городов Ростов-на-Дону, Аксай и Батайск. Особое внимание уделено обоснованию мощности слоя почвы, которую необходимо учитывать при расчетах запасов органического углерода. На основе анализа профильного распределения содержания органического вещества в погребенных почвенных горизонтах и сравнения с аналогичными горизонтами зональных черноземов, а также расчета средней глубины залегания почвообразующей породы (197 ± 19 см), установлена нижняя граница для запечатанных почв – 200 см. Данный слой позволяет учитывать весь гумусово-аккумулятивный профиль и получать более полные результаты. Средние значения содержания органического углерода составили $1,70 \pm 1,86\%$ и $0,75 \pm 0,55\%$ для верхних техногенных и погребенных горизонтов соответственно. Определены удельные запасы (на единицу площади) органического углерода в изученном слое для запечатанных почв Ростовской агломерации в целом. Они составили в среднем $178,18 \pm 24,11$ т/га. Доля верхних трансформированных горизонтов урбиков (UR) в общем пуле углерода составляет 30–40% ($73,13 \pm 63,57$ т/га). Полученные данные позволяют оценить масштабы запасов органического углерода в урбанизированной среде и их вклад в общий углеродный пул. Результаты исследования могут быть полезны для понимания процессов накопления и трансформации органического углерода в городских условиях, а также для разработки мероприятий по сохранению и восстановлению почвенного органического углерода на урбанизированных территориях.

Ключевые слова: антропогенное воздействие, городские почвы, органическое вещество, запечатывание городских территорий, углеродный пул, черноземы

Study of Carbon Content and Stocks in Soils of Sealed Areas in the Core of the Rostov Agglomeration

Skripnikov P.N.¹, Gorbov S.N.¹, Salnik N.V.¹, Tagiverdiev S.S.¹, Mezhenkov A.A.¹, Bezuglova O.S.¹

¹Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia, skripnikov@sfedu.ru

The article presents the results of a study and calculation of soil organic carbon stocks in sealed areas of the cities of Rostov-on-Don, Aksay, and Bataysk. Special attention is given to the justification of the soil layer thickness that should be considered when calculating soil organic carbon stocks. Based on the analysis of soil organic carbon profile distribution in buried soil horizons and their comparison with analogous horizons of zonal Chernozems, as well as on the calculation of the mean depth of the parent material (197 ± 19 cm), the lower boundary for sealed soils was set at 200 cm. This depth makes it possible to account for the entire humus-accumulative profile and obtain more comprehensive results. The mean soil organic carbon content amounted to $1.70 \pm 1.86\%$ and $0.75 \pm 0.55\%$ for the upper technogenic and buried horizons, respectively. Specific stocks (per unit area) of organic carbon in the studied layer of sealed soils of the Rostov agglomeration averaged 178.18 ± 24.11 t/ha. The contribution of the upper transformed Urbic (UR) horizons to the total carbon pool was estimated at 30–40% (73.13 ± 63.57 t/ha). The obtained data provides an assessment of the scale of organic carbon reserves in urbanized environments and their contribution to the overall carbon pool. The results of the study may be useful for understanding the processes of accumulation and transformation of organic carbon in urban conditions, as well as for developing measures aimed at conserving and restoring soil organic carbon in urbanized areas.

Keywords: anthropogenic impact, urban soils, organic matter, urban sealing, carbon pool, Chernozems

Введение. В последние десятилетия урбанизация стала одним из наиболее значимых факторов воздействия на окружающую среду. Современная тенденция к увеличению площади городских территорий ведет к трансформации природных экосистем и формированию специфических

условий жизнедеятельности человека. В этой связи изучение городских почв приобретает особую актуальность. Почва играет значительную роль в устойчивом функционировании экосистемы, а в условиях урбанизированной среды с дополнительным антропогенным прессом ее роль существенно возрастает (Bounoua et al., 2015; Bai et al., 2017; Jia et al., 2018; Liu et al., 2019). Она выполняет ряд важнейших функций, таких как фильтрация воды, регулирование климата, сохранение биоразнообразия и обеспечение условий для роста и развития растительности, почвенной фауны и микроорганизмов. Исследования показывают, что почва вносит существенный вклад в обеспечение экосистемных услуг (Adhikari, Hartemink, 2016; Jónsson, Davíðsdóttir, 2016; Pereira et al., 2018). Однако в городских условиях почва подвергается воздействию различных антропогенных факторов, которые могут привести к ее деградации и снижению способности выполнять свои функции (Schneider et al., 2012; Wang et al., 2017; Luo et al., 2020).

Изучение содержания и запасов органического углерода в почвах урбанизированных территорий чрезвычайно важно по целому ряду причин, обусловленных прежде всего незаменимой ролью органического вещества почвы в поддержании её стабильного функционирования и городской экосистемы в целом (Горбов и др., 2022; Скрипников и др., 2025; Xu et al., 2024; Zhang et al., 2024). Содержание органического углерода, ввиду его отзывчивости на внешние воздействия, может служить индикатором степени загрязнения почвы и её способности выполнять экологические функции. Одним из наиболее наглядных показателей жизнеспособности экосистемы является динамика изменения запасов органического углерода, отражающая количество аккумулированной солнечной энергии (Orr, 1992; Keeling, 2008). Экосистема, накапливающая углерод, является живой и развивающейся; теряющая его – утрачивает устойчивость (Janzen, 2005; Kogut et al., 2011). Актуальность данного исследования определяется его фокусом на Ростове-на-Дону — крупнейшем агломерационном центре Юга России. Этот регион представляет собой критически важный объект для почвенных исследований, поскольку здесь происходит интенсивное преобразование уникальных по своему природному плодородию черноземов, богатых гумусом (Безуглова и др., 2018; Горбов и др., 2022; Сальник и др., 2025; Скрипников и др., 2025). Противоречие между необходимостью сохранения ценнейшего почвенного ресурса и стремительной урбанизацией в городской среде выражено особенно остро: черноземы систематически замещаются техногенными

субстратами, перекрываются объектами инфраструктуры и подвергаются интенсивному химическому загрязнению.

Считается, что строительная деятельность (возведение зданий и дорог) может приводить к полной потере почвенного углерода или его постоянному исключению из биогеохимического цикла. Однако учитывая, что в городской среде режимы землепользования могут существенно меняться со временем, углеродный пул экранированных городских техноземов (Ecranic Technosols) может рассматриваться как потенциально доступный для вовлечения в биогеохимический цикл (Еремченко и др., 2016; Сухарева и др., 2023). Примером того, насколько динамичной может быть урбанизированная территория, является создание 30-гектарного субтропического парка на территории федеральной территории «Сириус» на ранее запечатанных участках. Это подчеркивает важность учета запасов органического вещества ($C_{\text{орг}}$) в запечатанных почвах как «законсервированного» ресурса, который может быть ремобилизован при изменении землепользования, что актуально для концепции устойчивого развития городов.

Исследования содержания и запасов $C_{\text{орг}}$ в городских почвах проводятся десятилетиями. Тем не менее, остается ряд нерешенных вопросов, связанных с особенностями накопления и распределения органического углерода в городских условиях, а также спецификой влияния антропогенного прессинга и сопутствующих факторов на его содержание. Восполнение пробелов в этой области знаний имеет большое фундаментальное и практическое значение для развития почвоведения и наук об окружающей среде в целом, а также для оценки экологического состояния городов, прогнозирования изменений климата и разработки мероприятий по повышению качества городских почв. Результаты исследования могут быть использованы для разработки мер по повышению плодородия почв и их устойчивости к антропогенному воздействию, в том числе стратегий управления городскими зелеными насаждениями и ревитализации нарушенных территорий.

Цель работы: анализ содержания и запасов органического углерода в почвах запечатанных территорий, как долговременного резервуара углерода, агломерации городов Юга России (Ростов-на-Дону, Аксай, Батайск), их количественная оценка для территории исследования и сравнение с литературными данными, характеризующими гумусное состояние зональных черноземов фоновых территорий.

Материалы и методы исследования.

Скрипников П. Н., Горбов С. Н., Сальник Н. В., Тагивердиев С. С., Меженков А. А., Безуглова О. С., Исследование содержания и запасов углерода в почвах запечатанных территорий ядра Ростовской агломерации // «Живые и биокосные системы». – 2025. – № 53; URL: <https://jbks.ru/archive/issue-53/article-3>; DOI: 10.18522/2308-9709-2025-53-3

Характеристика района исследований

Ростовская агломерация – обширная территория, включающая крупные города и поселения, расположенные вокруг единого центра на юге Европейской части России. Площадь этой территории составляет 5800 км², что соответствует примерно 40% площади юго-западной части Ростовской области. «Большой Ростов» является ядром агломерации и включает город Ростов-на-Дону, а также близлежащие города Аксай и Батайск (Тагивердиев, 2020). По состоянию на январь 2024 года официальная численность населения ядра агломерации составляет около 1,31 млн человек, что соответствует 61% от общей численности населения агломерации.¹ Согласно классификации Кеппена-Гейгера, климат агломерации характеризуется как влажный континентальный с жарким летом (Dfa). Среднегодовые климатические показатели включают температуру +9,9 °С, скорость ветра 3,2 м/с и количество осадков около 618 мм в год.

Почвенный покров на территории исследования разнообразен и представлен преимущественно черноземами миграционно-сегрегационными (Haplic Chernozem) на участках с низкой антропогенной нагрузкой (в основном в рекреационной зоне), а также антропогенно-преобразованными почвами, приуроченными к промышленным и селитебным зонам: урбостратоземы (Urbic Technosol), экранированные техноземы (Ekranic Technosol) и урбистратифицированными черноземами (Haplic Chernozem (Novic Loamic Technic)). Усиление антропогенной нагрузки, включая запечатывание, привело к фрагментации и деградации естественных почвенных ареалов, формируя мозаику из природных и техногенно-измененных почвенных тел, что характерно для биокосных систем урбанизированных территорий (Scalenghe, Marsan, 2009; Vasenev, Kuzyakov, 2018; O'Riordan et al., 2021). Естественная растительность на территории, занимаемой «Большим Ростовом», состояла из разнотравно-злаковых степей с доминированием родов *Stipa*, *Festuca*, *Koeleria* и представителей лугово-степного разнотравья. Длительное антропогенное воздействие привело к тому, что к настоящему времени зональные растительные сообщества значительно сократились, а зональная флора претерпела трансформацию, сформировав городскую флору. Наблюдается негативная тенденция, выраженная в обеднении естественных

¹ Численность постоянного населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2024 года Федеральная служба государственной статистики (27 апреля 2024).
<https://rosstat.gov.ru/compendium/document/13282>

Скрипников П. Н., Горбов С. Н., Сальник Н. В., Тагивердиев С. С., Меженков А. А., Безуглова О. С., Исследование содержания и запасов углерода в почвах запечатанных территорий ядра Ростовской агломерации // «Живые и биокосные системы». – 2025. – № 53; URL: <https://jbks.ru/archive/issue-53/article-3>; DOI: 10.18522/2308-9709-2025-53-3

флор, их космополитизации, адвентизации и унификации, упрощении типологической структуры (Vakhnenko, 2000).

Методы исследований

Полевые исследования включали заложение 10 почвенных разрезов на запечатанных участках селитебной и промышленной зон, а также 13 разрезов рекреационной зоны ядра Ростовской агломерации (Ростов-на-Дону, Аксай, Батайск) (рис. 1).

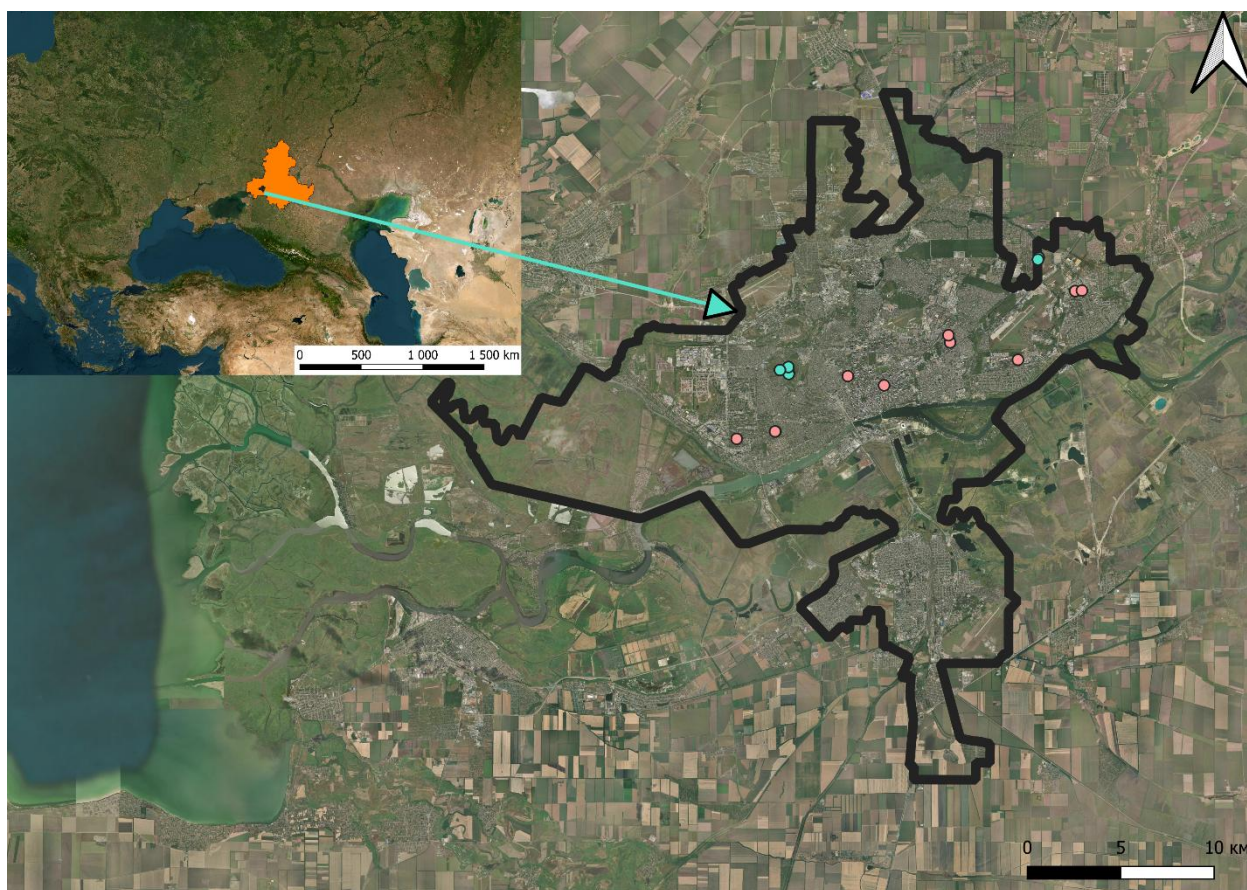


Рис. 1 — Картосхема расположения почвенных разрезов в границах Ростовской агломерации (розовыми пунсонами отмечены запечатанные почвы, бирюзовыми – черноземы залежных участков)

Отбор образцов почвы проводился послойно из всех генетических горизонтов, включая верхние техногенные (UR – урбик) и погребенные естественные ([AU], [BCA], [C]) до почвообразующей породы. Общее количество проанализированных образцов составило 85 штук.

Запасы общего углерода (ТОС, т/га) рассчитывали по формуле:

$$\text{Запасы углерода} = C_{\text{орг}} \times H \times \text{BD} \times \text{AI}, \text{ где:}$$

Скрипников П. Н., Горбов С. Н., Сальник Н. В., Тагивердиев С. С., Меженков А. А., Безуглова О. С., Исследование содержания и запасов углерода в почвах запечатанных территорий ядра Ростовской агломерации // «Живые и биокосные системы». – 2025. – № 53; URL: <https://jbks.ru/archive/issue-53/article-3>; DOI: 10.18522/2308-9709-2025-53-3

$C_{\text{орг}}$ – содержание органического углерода, %; H – мощность горизонта, см; BD – плотность почвы, г/см³; AI – коэффициент пересчета на каменистую часть и антропогенные включения, суммарный коэффициент пересчета в т/га равен 1.

С учетом данных о физическом состоянии почв Ростовской агломерации использовались различные значения плотности для антропогенно-трансформированных и погребенных естественных почвенных горизонтов (1,65 и 1,50 г/см³ соответственно) (Безуглова и др., 2018).

Содержание органического углерода определяли методом сухого высокотемпературного каталитического сжигания с использованием элементного анализатора TOC-L CPN Shimadzu, оборудованного модулем для твердых образцов (SSM 5000a, Kyoto, Japan). Анализ выполняли в два этапа: на первом этапе образец почвы прокаливали при 900 °С для определения содержания общего углерода (Total Carbon, TC). Затем образец почвы с добавлением ортофосфорной кислоты нагревали до 200 °С, что позволило определить содержание неорганического углерода (Inorganic Carbon, IC). Разница между TC и IC давала содержание общего почвенного органического углерода (Soil Organic Carbon, SOC) (Sleutel et al., 2007; Roper et al., 2019).

Статистическая обработка данных (расчет среднего арифметического значения, стандартного отклонения, коэффициента вариации, корреляционный анализ) проводилась с использованием пакета Statistica 10.0.

Результаты и обсуждение

Обоснование мощности слоя для расчета запасов $C_{\text{орг}}$ в погребенных почвах

Расчет запасов органического углерода основывается на мощности изучаемого почвенного слоя. Традиционно расчет запасов органического углерода в черноземах проводят для слоя 0–100 см, так как этот слой является наиболее плодородным и богатым органическим веществом. Он содержит значительное количество гумуса, являющегося основным источником питательных веществ для растений. Кроме того, этот слой наиболее важен для сельскохозяйственного производства, так как в нем протекает большая часть биологических процессов, влияющих на плодородие почвы (Batjes, 1996; Щепаченко и др., 2013; Lorenz K., Lal, 2018). Однако следует отметить, что расчет запасов органического углерода в слое 0–100 см может не учитывать всех особенностей распределения органического вещества в городских почвах, особенно запечатанных. В нашем исследовании оценки

запасов $C_{\text{орг}}$ запечатанных территорий, которые потенциально могут быть вовлечены в биогеохимический цикл, мы попытались определить глубину, которую следует учитывать в расчетах. В первую очередь, мы руководствовались идеей установления нижней границы на глубине залегания почвообразующей породы. Это было обусловлено особенностями профильного распределения $C_{\text{орг}}$ в погребенных почвенных горизонтах.

Сравнение содержания органического углерода в горизонтах зональных черноземов с аналогичными горизонтами экранированных техноземов (Ecranic Technosols), погребенных под антропогенными напластованиями, показало, что достоверная разница наблюдается только в верхней части профиля (гумусово-аккумулятивные горизонты AU и [AU]). Анализ показал, что в горизонтах естественных почв среднее значение содержания $C_{\text{орг}}$ составляет $2,00 \pm 0,50\%$, что достоверно выше, чем в погребенном аналоге ($1,31 \pm 0,45\%$). Это может быть связано с частичным удалением (скальпированием) горизонта при строительных работах, а также с тем, что после погребения почвы под слоем плотных или непроницаемых антропогенных материалов (асфальт, бетон) поступление в почву отмершей растительности – основного источника органического вещества – прекращается. Однако с глубиной различия в содержании органического углерода нивелируются, и разница между сравниваемыми горизонтами не подтверждается на уровне значимости $p < 0,05$. Замедление процессов минерализации гумуса погребенных горизонтов приводит к тому, что средняя и нижняя часть почвенного профиля мало подвержены изменениям. Такая специфика в накоплении и профильном распределении органического углерода указывает на «двусоставной» профиль погребенных черноземов, когда изменяется не вся почвенная толща, а лишь ее верхняя часть.

Изменения затрагивают в основном бывший дневной гумусово-аккумулятивный горизонт, который в современных условиях находится в непосредственном контакте с погребенными антропогенными напластованиями, а именно горизонтами «урбик» (UR – urbic). В целом, погребенный чернозем сохраняет свои природные черты, будучи длительным временем выключенным из естественного биогеохимического круговорота веществ. Это указывает на консервацию значительного пула углерода в погребенной части профиля, который, несмотря на изоляцию, остается важным компонентом биокосной системы города.

На основе анализа 9 разрезов запечатанных почв установлено, что средняя глубина залегания почвообразующей породы составляет 197 ± 19 см. Для естественных почвенных профилей это значение равно 109 ± 8 см ($N = 13$) (рис. 2).

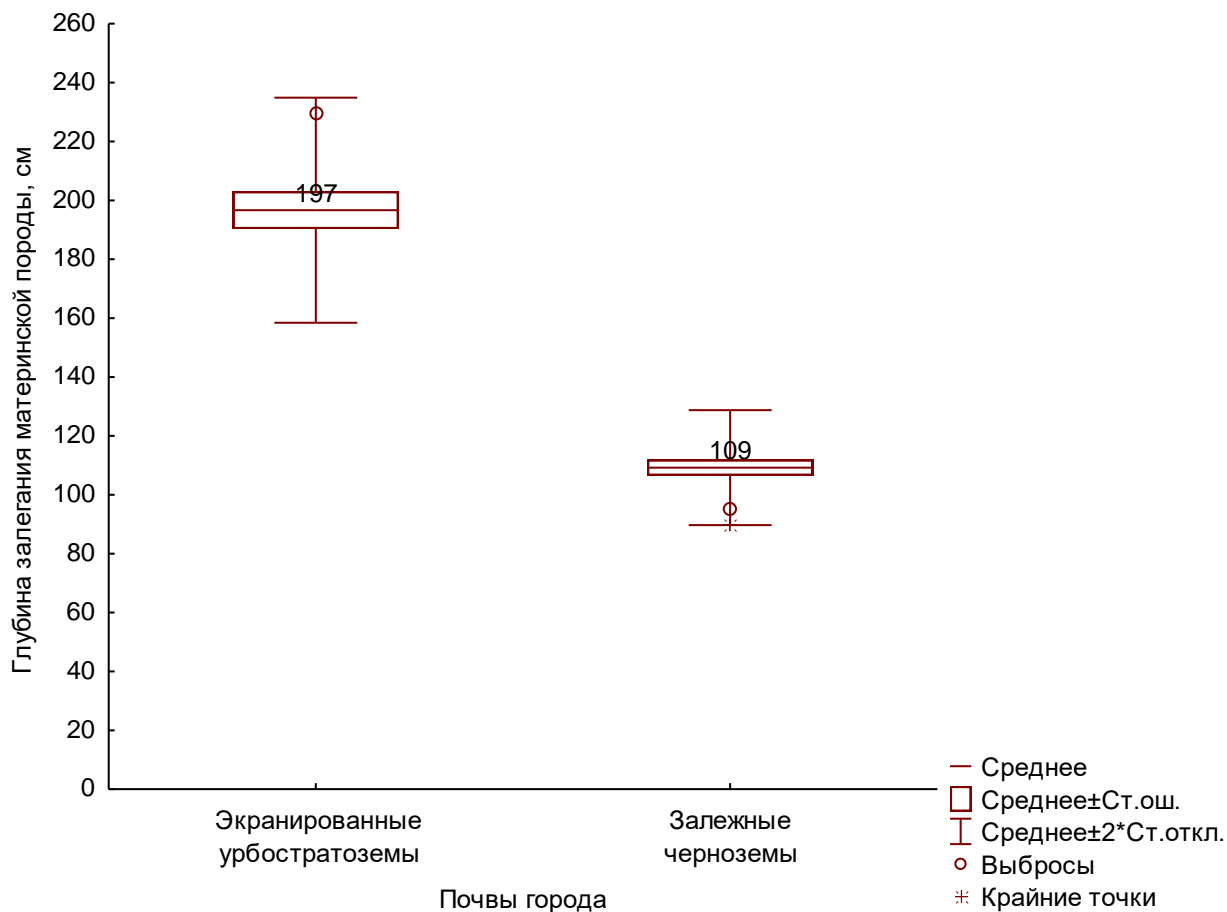


Рис. 2 — Характеристика частотного распределения глубины залегания материнской породы для исследованных почв города

На основании представленных данных можно заключить, что для расчета запасов органического углерода запечатанных (экранированных) почв целесообразно использовать мощность слоя, равную 200 см. Это позволит учитывать гумусово-аккумулятивный профиль в целом и получать более точные результаты. Учет слоя 0–200 см принципиально важен для корректной оценки реальных запасов $C_{орг}$ в запечатанных почвах, так как исключение более глубоких горизонтов ([BCA], [C]), содержащих значительный стабильный пул углерода, приводит к существенному (на 30–50%, по нашим оценкам) занижению итоговых значений.

Оценка степени запечатывания территории Ростовской агломерации

Специфика оценки содержания и запасов органического углерода городских почв заключается в том, что часто эти показатели игнорируются из-за высокой степени запечатывания территории. Иногда ее условно приравнивают к 100% (Schaldach., Alcamo, 2007), исключая значительные площади из расчетов общих запасов и регионального углеродного баланса. Однако реальные цифры не столь однозначны. Более детальные исследования показывают, например, что для города Волгограда (степная климатическая зона) доля запечатанных почв составляет 18% от площади города и напрямую связана с площадью селитебных зон, степенью развития промышленности и транспортной инфраструктуры (Гордиенко и др., 2019). В целом, доля запечатанных территорий может сильно варьировать (от 5 до 70%) в зависимости от особенностей исторического развития городов и соотношения различных функциональных зон. Ю.А. Дворников с соавторами (2021) оценили запечатывание территории городского округа Ростов-на-Дону, которое составило 27,6%. Наибольшая степень запечатывания наблюдалась вблизи речного порта. Для точного расчета общих запасов $C_{орг}$ по агломерации в целом нами на основании имеющихся данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) была определена площадь запечатанных почв в ядре агломерации «Большой Ростов». Она оказалась равной 13783 га, что составляет примерно 30% исследуемой территории. Это позволило перейти от удельных запасов к общему пулу углерода.

Расчет запасов органического углерода в антропогенных и погребенных естественных горизонтах почв и их сравнение с ненарушенными почвами

Среднее значение содержания органического углерода почв ($C_{орг}$) в слое 0–200 см составило $1,11 \pm 1,29\%$. Выборка характеризуется высоким значением коэффициента вариации $V=117\%$ и, соответственно, значительной неоднородностью. Содержание $C_{орг}$ в антропогенных горизонтах (UR) составляет $1,70 \pm 1,86\%$, а в погребенных горизонтах (AU, BSA, C) – $0,75 \pm 0,55\%$ (табл. 1). Профильное распределение $C_{орг}$ в погребенных горизонтах подчиняется тенденции снижения его содержания с глубиной. Корреляционный анализ показал достоверную тесную обратную связь между содержанием $C_{орг}$ в образце и глубиной отбора ($r = -0,48$). Для антропогенных горизонтов урбик достоверной связи не выявлено, что может косвенно подтверждать хаотичный характер профильного распределения $C_{орг}$ в этих сильно нарушенных слоях.

Таблица 1 — Основные параметры описательной статистики содержания органического углерода (%) в техноземе экранированном (Ekranic Technosol)

Горизонты	n	M	Me	Min	Max	σ	V
UR	28	1,70	1,19	0,00	7,65	1,86	109,32
[AU], [BCA], [C]	47	0,75	0,68	0,14	2,16	0,55	73,06
Среднее	75	1,11	0,70	0,00	7,65	1,29	116,66

Определены удельные запасы органического углерода в изучаемом слое 0–200 см. Средний запас для территории города составил $178,18 \pm 24,11$ т/га (табл. 2). Доля верхних трансформированных горизонтов урбик (UR) в общем пуле углерода составляет 30–40% ($73,13 \pm 63,57$ т/га), что может быть обусловлено меньшей мощностью этих горизонтов ($\approx 25\%$ от мощности изучаемого слоя) по сравнению с погребенной частью профиля.

Таблица 2 — Основные параметры описательной статистики удельных запасов органического углерода (%) в экранированном техноземе (Ekranic Technosol) слое 0–200 см (т/га)

Горизонты	n	M	Me	Min	Max	σ	V
UR	10	73,13	51,77	22,45	218,64	63,57	86,93
[AU], [BCA], [C]	10	105,05	124,90	7,56	136,34	43,10	41,03
Сумма (0-200 см)	10	178,18	178,72	146,95	226,20	24,11	13,53

Сравнение данных по удельным запасам углерода запечатанных почв города с результатами исследования черноземов степной зоны Европейской части России, описанными в литературе, показывает, что в экранированных техноземах (Ekranic Technosols) запасы $C_{\text{орг}}$ на 25% ниже, чем в целинных черноземах. Важно отметить, что это сравнение проведено для слоя 0–200 см, в то время как для зональных черноземов литературные данные приводятся для слоя 0–100 см. Расчеты показывают, что даже с учетом более глубокого слоя, запасы в запечатанных почвах ниже, что подчеркивает потери углерода в результате урбанизации, хотя часть потерь компенсируется техногенным поступлением органического вещества в горизонты UR и нижележащие погребенные горизонты.

Общие запасы $C_{\text{орг}}$ запечатанных почв ядра Ростовской агломерации («Большого Ростова» площадью 13783 га) составляют 2411×10^3 тонн с ошибкой оценки 15–20%. Приведенная площадь изученной территории делает запасы $C_{\text{орг}}$ весьма значительными. Они составляют примерно 0,001%

от общих запасов углерода в почвах степной зоны Европейской части России (21,3 Пг С в целом) (Щепащенко и др., 2013). Хотя эта доля кажется небольшой, следует учитывать, что это запас на относительно небольшой, но интенсивно урбанизированной территории и находится в «стабильном» состоянии под запечатывающим слоем, потенциально менее подверженном быстрой минерализации по сравнению с открытыми почвами. Учет таких запасов обязателен для построения точных региональных и локальных углеродных балансов.

Полученные данные позволяют оценить масштабы запасов $C_{\text{орг}}$ в урбанизированной среде и их вклад в общий углеродный пул. Однако для лучшего понимания процессов накопления и трансформации органического вещества в городских условиях необходимо учитывать различные факторы, такие как тип почвы, степень антропогенного воздействия, климатические условия и другие параметры. Также важно отметить, что сохранение и восстановление почвенного органического углерода является важной задачей в контексте устойчивого развития городов и охраны окружающей среды. Мероприятия по улучшению качества почв, такие как озеленение, использование органических удобрений и снижение интенсивности антропогенной нагрузки, могут способствовать увеличению запасов $C_{\text{орг}}$ и повышению плодородия городских земель. Результаты данной работы подчеркивают, что при ревитализации запечатанных территорий (снятие асфальта, создание парков) следует учитывать наличие значительного пула «законсервированного» углерода в глубоких слоях. Его активация или стабилизация должны быть предметом отдельного изучения.

Заключение. Установлено, что для расчета запасов органического углерода экранированных (запечатанных) техноземов Ростовской агломерации целесообразно использовать мощность слоя 0–200 см. Это позволяет учитывать гумусово-аккумулятивный профиль в целом и получать более точные результаты, так как средняя глубина залегания почвообразующей породы под антропогенными напластованиями составляет 197 ± 19 см.

Среднее значение содержания органического углерода в слое 0–200 см оставляет 1,11%. Содержание $C_{\text{орг}}$ в горизонтах «урбик» (UR) в среднем равно $1,70 \pm 1,86\%$, что выше, чем в погребенных горизонтах ($0,75 \pm 0,55\%$). Высокая вариабельность в горизонтах UR ($V=109\%$) отражает сильную неоднородность антропогенного материала.

Удельные запасы $C_{\text{орг}}$ в слое 0–200 см для запечатанных почв ядра Ростовской агломерации в среднем составили $178,18 \pm 24,11$ т/га. При этом доля верхних техногенных горизонтов (UR) составляет 30–40% от общего запаса ($73,13$ т/га), несмотря на их меньшую мощность (~25% от 200 см), что указывает на относительное обогащение углеродом верхних слоев за счет техногенных поступлений.

Общие запасы $C_{\text{орг}}$ в запечатанных почвах территории «Большой Ростов» площадью 13783 га оценены в 2411×10^3 тонн. Хотя это составляет лишь ~0,001% от запасов $C_{\text{орг}}$ степной зоны Европейской России, данная величина является значимой для углеродного баланса локальной урбанизированной территории и должна учитываться в региональных кадастрах.

Основная научная новизна работы заключается в комплексной оценке запасов $C_{\text{орг}}$ в запечатанных почвах на нестандартную глубину (0–200 см), обоснованной спецификой их строения, и в количественной оценке вклада как антропогенно-трансформированных (UR), так и погребенных естественных горизонтов в общий пул углерода. Полученные данные подчеркивают роль запечатанных почв как специфического, долговременного резервуара углерода в биокосной системе города

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-27-00390) на базе Южного федерального университета, <https://rscf.ru/project/24-27-00390/>.

Список литературы

Безуглова О. С., Тагивердиев С. С., Горбов С. Н. Физические характеристики городских почв Ростовской агломерации // Почвоведение. 2018. № 9. – С. 1153-1159. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18090022>

Вахненко Д. В. Антропогенная трансформация флоры Северо-Восточного Приазовья в пределах Ростовской городской агломерации: дисс. кандидата биол. наук. Ростов-на-Дону, 2000. 326 с.

Горбов С. Н., Безуглова О. С., Скрипников П. Н., Тищенко С. А. Растворимое органическое вещество в почвах Ростовской агломерации // Почвоведение. 2022. № 7. – С. 894-908. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2207005X>

Гордиенко О. А., Манаенков И. В., Холоденко А. В., Иванцова Е. А. Картографирование и оценка степени запечатанности почв города Волгограда

Скрипников П. Н., Горбов С. Н., Сальник Н. В., Тагивердиев С. С., Меженков А. А., Безуглова О. С., Исследование содержания и запасов углерода в почвах запечатанных территорий ядра Ростовской агломерации // «Живые и биокосные системы». – 2025. – № 53; URL: <https://jbks.ru/archive/issue-53/article-3>; DOI: 10.18522/2308-9709-2025-53-3

// Почвоведение. 2019. № 11. – С. 1383–1392.

<https://doi.org/10.1134/S0032180X19110054>

Еремченко О. З., Шестаков И. Е., Москвина Н. В. Почвы и техногенные поверхностные образования урбанизированных территорий Пермского Прикамья. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2016. – 252 с. – ISBN 978-5-7944-2753-0.

Сальник Н. В., Тагивердиев С. С., Скрипников П. Н., Горбов С. Н., Безуглова О. С. Эколого-геохимическое состояние естественных и антропогенно-преобразованных почв селитебных территорий г. Ростов-на-Дону // Трансформация экосистем. 2025. Т. 8. № 3 (30). – С. 35–63.

<https://doi.org/10.23859/estr-240325>

Скрипников П. Н., Горбов С. Н., Безуглова О. С., Меженков А. А., Тагивердиев С. С., Сальник Н. В., Кравченко М. О., Носов Г. Н., Терехов И. В., Матецкая А. Ю. Оценка запасов органического углерода в городских почвах Ростовской агломерации // Почвоведение. 2025. № 5. – С. 591–602.

<https://doi.org/10.31857/S0032180X25050047>

Сухарева Т. А., Иванова Е. А., Ершов В. В., Зенкова И. В., Корнейкова М. В., Штабровская И. М., Сошина А. С. Содержание и запасы углерода и азота в наземных экосистемах Мурманской области // Вопросы лесной науки. 2023. Т. 6(2). – С. 1–75.

Тагивердиев С. С. Влияние урбопедогенеза на морфологические и физические свойства почв Ростовской агломерации: Автореф. дис. кандидата биол. наук. – Ростов н/Д., 2020. – 24 с.

Щепашенко Д. Г., Мухортова Л. В., Швиденко А. З., Ведрова Э. Ф. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. № 2. – С. 123–132. <https://doi.org/10.7868/s0032180x13020123>

Adhikari K., Hartemink A. E. Linking soils to ecosystem services – A global review // Geoderma. 2016. № 262. – P. 101–111.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>

Bai X., McPhearson T., Cleugh H., Nagendra H., Tong X., Zhu T., Zhu Y. G. Linking urbanization and the environment: Conceptual and empirical advances // Annual Review of Environment and Resources. 2017. Vol. 42(1). – P. 215–240.

<https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102016-061128>

Скрипников П. Н., Горбов С. Н., Сальник Н. В., Тагивердиев С. С., Меженков А. А., Безуглова О. С., Исследование содержания и запасов углерода в почвах запечатанных территорий ядра Ростовской агломерации // «Живые и биокосные системы». – 2025. – № 53; URL: <https://jbks.ru/archive/issue-53/article-3>; DOI: 10.18522/2308-9709-2025-53-3

Batjes N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world // *European Journal of Soil Science*. 1996. Vol. 47. № 2. – P. 151–163.

Bezuglova O. S., Gorbov S. N., Okolelova A. A., Salnik N. V., Tagiverdiev S. S., Plachov G. A. Particle-size distribution and heavy metals accumulation in soils of Rostov-on-Don // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 368(1). – P. 012009.

Bounoua L., Zhang P., Mostovoy G., Thome K., Masek J., Imhoff M., et al. Impact of urbanization on US surface climate // *Environmental Research Letters*. 2015. Vol. 10(8). – P. 084010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084010>

Dvornikov Y. A., Vasenev V. I., Romzaykina O. N., Grigorieva V. E., Litvinov Y. A., Gorbov S. N., Gosse D. D. Projecting the urbanization effect on soil organic carbon stocks in polar and steppe areas of European Russia by remote sensing // *Geoderma*. 2021. Vol. 399. – P. 115039. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115039>

Janzen H. H. Soil carbon: a measure of ecosystem response in a changing world? // *Canadian Journal of Soil Science*. 2005. Vol. 85(Special Issue). – P. 467–480. <https://doi.org/10.4141/S04-081>

Jia Z., Li S., Wang L. Assessment of soil heavy metals for eco-environment and human health in a rapidly urbanization area of the upper Yangtze Basin // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8(1). – P. 3256. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21569-6>

Jónsson J. Ö. G., Davíðsdóttir B. Classification and valuation of soil ecosystem services // *Agricultural Systems*. 2016. Vol. 145. – P. 24–38. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.02.010>

Keeling R. F. Recording Earth's vital sign // *Science*. 2008. Vol. 319. – P. 1771–1772. <https://doi.org/10.1126/science.115676>

Kogut B. M., Fried A. S., Masyutenko N. P., Kuvaeva Y. V., Romanenkov V. A., Lazarev V. I., Kholodov V. A. Dynamics of organic carbon content in typical chernozem under conditions of long-term field experiment // *Agrochemistry*. 2011. № 12. – P. 37–44.

Liu W., Zhan J., Zhao F., Yan H., Zhang F., Wei X. Impacts of urbanization-induced land-use changes on ecosystem services: A case study of the Pearl River Delta Metropolitan Region, China // *Ecological Indicators*. 2019. Vol. 98. – P. 228–238. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.054>

Скрипников П. Н., Горбов С. Н., Сальник Н. В., Тагивердиев С. С., Меженков А. А., Безуглова О. С., Исследование содержания и запасов углерода в почвах запечатанных территорий ядра Ростовской агломерации // «Живые и биокосные системы». – 2025. – № 53; URL: <https://jbks.ru/archive/issue-53/article-3>; DOI: 10.18522/2308-9709-2025-53-3

Lorenz K., Lal R. Soil carbon stock // Carbon Sequestration in Agricultural Ecosystems. Cham: Springer, 2018. – P. 39–136.

Luo Y., Li Q., Wang C., Li B., Stomph T. J., Yang J., et al. Negative effects of urbanization on agricultural soil easily oxidizable organic carbon down the profile of the Chengdu Plain, China // Land Degradation & Development. 2020. Vol. 31(3). – P. 404–416. <https://doi.org/10.1002/ldr.3458>

O'Riordan R., Davies J., Stevens C., Quinton J. N. The effects of sealing on urban soil carbon and nutrients // Soil. 2021. Vol. 7(2). – P. 661–675.

Orr D. W. Ecological literacy: Education and the transition to a postmodern world. Albany: State University of New York Press, 1992. June 1992. American Journal of Alternative Agriculture. 7 (1–2). DOI: 10.1017/S0889189300004537.

Pereira P., Bogunovic I., Muñoz-Rojas M., Brevik E. C. Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management // Current Opinion in Environmental Science & Health. 2018. Vol. 5. – P. 7–13.
<https://doi.org/10.1016/j.coesh.2017.12.003>

Roper W. R., Robarge W. P., Osmond D. L., Heitman J. L. Comparing four methods of measuring soil organic matter in North Carolina soils // Soil Science Society of America Journal. 2019. Vol. 83(2). – P. 466–474.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2018.03.0105>

Scalenghe R., Marsan F. A. The anthropogenic sealing of soils in urban areas // Landscape and Urban Planning. 2009. Vol. 90(1–2). – P. 1–10.

Schaldach R., Alcamo J. Simulating the effects of urbanization, afforestation and cropland abandonment on a regional carbon balance: a case study for Central Germany // Regional Environmental Change. 2007. Vol. 7. – P. 131–148.

Schneider A., Logan K. E., Kucharik C. J. Impacts of urbanization on ecosystem goods and services in the US Corn Belt // Ecosystems. 2012. Vol. 15. – P. 519–541.
<https://doi.org/10.1007/s10021-012-9519-1>

Sleutel S., De Neve S., Singier B., Hofman G. Quantification of organic carbon in soils: A comparison of methodologies and assessment of the carbon content of organic matter // Communications in Soil Science and Plant Analysis. 2007. Vol. 38(19–20). – P. 2647–2657. <https://doi.org/10.1080/00103620701662877>

Vasenev V., Kuzyakov Y. Urban soils as hot spots of anthropogenic carbon accumulation: Review of stocks, mechanisms and driving factors // Land

Degradation & Development. 2018. Vol. 29(6). – P. 1607–1622.

<https://doi.org/10.1002/ldr.2944>

Wang H., Marshall C. W., Cheng M., Xu H., Li H., Yang X., Zheng T. Changes in land use driven by urbanization impact nitrogen cycling and the microbial community composition in soils // Scientific Reports. 2017. Vol. 7(1). – P. 44049.

<https://doi.org/10.1038/srep44049>

Xu F., Zhao S., Li S. Dynamic responses of soil organic carbon to urbanization: A global perspective // Global Change Biology. 2024. Vol. 30(11). – P. e17573.

<https://doi.org/10.1111/gcb.17573>

Zhang F., Zhong J., Zhao Y., Cai C., Liu W., Wang Q., et al. Urbanization-induced soil organic carbon loss and microbial-enzymatic drivers: insights from aggregate size classes in Nanchang city, China // Frontiers in Microbiology. 2024. Vol. 15. – P. 1367725.

References

Bezuglova O. S., Tagiverdiev S. S., Gorbov S. N. Physical Properties of Urban Soils in Rostov Agglomeration // Eurasian Soil Science, 2018. № 51 (9). P. 1105—1110. DOI: 10.1134/S1064229318090028/.

Vakhnenko D. V. Anthropogenic transformation of the flora of the North-Eastern Azov region within the Rostov urban agglomeration: Diss. of Cand. Sci. (Biol.) Rostov-on-Don, 2000. 326 p.

Gorbov S. N., Bezuglova O. S., Skripnikov P. N., Tishchenko S. A. Soluble Organic Matter in Soils of the Rostov Agglomeration // Eurasian Soil Science, 2022, Vol. 55, No. 7, pp. 957–970. DOI: 10.1134/S1064229322070055.

Gordienko O. A., Manaenkov I. V., Kholodenko A. V., Ivantsova E. A. Mapping and Assessment of Sealing Rate of Soils in the City of Volgograd // Eurasian Soil Science. 2019. T. 52. № 11. C. 1439–1446.

Eremchenko O. Z., Shestakov I. E., Moskvina N. V. Soils and technogenic surface formations of urbanized territories of the Perm Kama region. Perm: Perm State National Research University, 2016. – 252 p. – ISBN 978-5-7944-2753-0.

Скрипников П. Н., Горбов С. Н., Сальник Н. В., Тагивердиев С. С., Меженков А. А., Безуглова О. С., Исследование содержания и запасов углерода в почвах запечатанных территорий ядра Ростовской агломерации // «Живые и биокосные системы». – 2025. – № 53; URL: <https://jbks.ru/archive/issue-53/article-3>; DOI: 10.18522/2308-9709-2025-53-3

Salnik N. V., Tagiverdiev S. S., Skripnikov P. N., Gorbov S. N., Bezuglova O. S. Ecological and geochemical state of natural and anthropogenically transformed soils of residential areas of Rostov-on-Don // Transformation of ecosystems. 2025. Vol. 8. No. 3 (30). – P. 35–63. <https://doi.org/10.23859/estr-240325>

Skripnikov P.N., Gorbov S.N., Bezuglova O.S., Mezhenkov A.A., Tagiverdiev S.S., Salnik N.V., Kravchenko M.O., Nosov G.N., Terekhov I.V., Matetskaya A.Y. Estimation of soil organic carbon stocks of the territory of cities of the center of Rostov agglomeration // Почвоведение. - 2025. - N. 5. - P. 591-602. doi: 10.31857/S0032180X25050047

Sukhareva T. A., Ivanova E. A., Ershov V. V., Zenkova I. V., Korneykova M. V., Shtabrovskaya I. M., Soshina A. S. Content and reserves of carbon and nitrogen in terrestrial ecosystems of the Murmansk region // Voprosy lesnoi nauki. 2023. Vol. 6(2). – P. 1–75.

Tagieverdiev S. S. Influence of urban pedogenesis on the morphological and physical properties of soils in the Rostov agglomeration: Abstract of Cand. Sci. (Biol.) Dissertation. – Rostov n/D., 2020. – 24 p.

Shchepashchenko D. G., Mukhortova L. V., Shvidenko A. Z., Vedrova E. F. Organic carbon reserves in Russian soils // Pochvovedenie. 2013. No. 2. – P. 123–132. <https://doi.org/10.7868/s0032180x13020123>

Adhikari K., Hartemink A. E. Linking soils to ecosystem services – A global review // Geoderma. 2016. No. 262. – P. 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>

Bai X., McPhearson T., Cleugh H., Nagendra H., Tong X., Zhu T., Zhu Y. G. Linking urbanization and the environment: Conceptual and empirical advances // Annual Review of Environment and Resources. 2017. Vol. 42(1). – P. 215–240. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102016-061128>

Batjes N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world // European Journal of Soil Science. 1996. Vol. 47. No. 2. – P. 151–163.

Bezuglova O. S., Gorbov S. N., Okolelova A. A., Salnik N. V., Tagiverdiev S. S., Plachov G. A. Particle-size distribution and heavy metals accumulation in soils of Rostov-on-Don // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 368(1). – P. 012009.

Bounoua L., Zhang P., Mostovoy G., Thome K., Masek J., Imhoff M., et al. Impact of urbanization on US surface climate // *Environmental Research Letters*. 2015. Vol. 10(8). – P. 084010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/8/084010>

Dvornikov Y. A., Vasenev V. I., Romzaykina O. N., Grigorieva V. E., Litvinov Y. A., Gorbov S. N., Gosse D. D. Projecting the urbanization effect on soil organic carbon stocks in polar and steppe areas of European Russia by remote sensing // *Geoderma*. 2021. Vol. 399. – P. 115039.

<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115039>

Janzen H. H. Soil carbon: a measure of ecosystem response in a changing world? // *Canadian Journal of Soil Science*. 2005. Vol. 85(Special Issue). – P. 467–480.

<https://doi.org/10.4141/S04-081>

Jia Z., Li S., Wang L. Assessment of soil heavy metals for eco-environment and human health in a rapidly urbanizing area of the upper Yangtze Basin // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8(1). – P. 3256. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21569-6>

Jónsson J. Ö. G., Davíðsdóttir B. Classification and valuation of soil ecosystem services // *Agricultural Systems*. 2016. Vol. 145. – P. 24–38.

<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.02.010>

Keeling R. F. Recording Earth's vital sign // *Science*. 2008. Vol. 319. – P. 1771–1772. <https://doi.org/10.1126/science.115676>

Kogut B. M., Fried A. S., Masyutenko N. P., Kuvaeva Y. V., Romanenkov V. A., Lazarev V. I., Kholodov V. A. Dynamics of organic carbon content in typical chernozem under conditions of long-term field experiment // *Agrochemistry*. 2011. No. 12. – P. 37–44.

Liu W., Zhan J., Zhao F., Yan H., Zhang F., Wei X. Impacts of urbanization-induced land-use changes on ecosystem services: A case study of the Pearl River Delta Metropolitan Region, China // *Ecological Indicators*. 2019. Vol. 98. – P. 228–238.

Статья поступила в редакцию 2 сентября 2025 г.

Поступила после доработки 11 сентября 2025 г.

Принята к печати 12 сентября 2025 г.

Received September 2, 2025

Revised September 11, 2025

Accepted September 12, 2025