УДК 631.4:639.3

DOI: 10.18522/2308-9709-2026-57-1

ДИАГНОСТИКА И ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ТИПОЛОГИЯ ПОЧВ РЫБОВОДНЫХ ПРУДОВ СУХОСТЕПНОЙ ЗОНЫ

Козырев Д. А.[1*], Рудой Д. В.[1], Горбов С. Н.[2], Одабашян М. Ю.[1], Поляков А. Г.[1], Шевченко В. Н.[1], Сальник Н. В.[2]

[1]Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

[2]Научно-технологический университет «Сириус», Федеральная территория Сириус, Россия

dinis.kozyrev@bk.ru*, rudoy.d@gs.donstu.ru, gorbow@mail.ru, modabashyan@donstu.ru, ag.polyakov@mail.ru, vikakhorosheltseva@gmail.com, n.salnik.w@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-1202-6622, 0000-0002-1916-8570, 0000-0002-0174-1631, 0000-0002-3371-0098, 0009-0001-2163-1683, 0000-0002-5001-4959, 0000-0001-7840-365X

Аннотация

Предложена классификационно-диагностическая схема почв рыбоводных прудов сухостепной зоны, основанная на почвенно-генетических критериях. По шести функциональным зонам прудового хозяйства установлено, что при литологической однородности субстрата наиболее устойчиво разделяет их отношение C/N ($H = 7{,}81$; $p = 0{,}020$; $F = 10{,}79$; $p = 0{,}004$; $\varepsilon^2 \approx 0{,}71$). Ложе действующего пруда не обогащено органическим углеродом относительно зональной пашни. Карбонатное обогащение выражено во всех изученных объектах и статистически не связано с органическим ($\rho = -0{,}04$). Введен интегральный органо-генетический индекс (ОГИ) и построена трехчленная генетическая типология: органо-аккумулятивные, карбонатно-субаквальные и минерально-деградированные почвы. Субстраты действующего пруда отнесены к антропогенным почвам с субаквальной фазой на начальной стадии развития и предварительно сопоставлены с таксонами WRB 2022 и Soil Taxonomy. Схема разработана на материале одного прудового хозяйства и требует проверки на других объектах.

Козырев Д. А., Рудой Д. В., Горбов С. Н., Одабашян М. Ю., Поляков А. Г., Шевченко В. Н., Сальник Н. В., Диагностика и генетическая типология почв рыбоводных прудов сухостепной зоны // «Живые и биокосные системы». – 2026. – № 57; URL: https://jbks.ru/archive/issue-57/article-1; DOI: 10.18522/2308-9709-2026-57-1

Ключевые слова

субаквальное почвообразование; накопление $CaCO_3$; летование; гумификация; минерализация органического вещества; интегральный индекс; антропогенно-преобразованные почвы; каштановые почвы.

Введение

Почвы рыбоводных прудов занимают особое место среди объектов почвенной систематики. Они формируются в условиях длительного затопления, испытывают постоянное воздействие природных и техногенных факторов и существенно отличаются как от автоморфных почв суши, так и от природных донных отложений. Несмотря на широкое использование понятия «донные почвогрунты» (pond bottom soils) в литературе по аквакультуре (Boyd, 1995; Munsiri et al., 1995), их положение в современных почвенных классификациях остается недостаточно определенным.

Современные представления о субаквальном почвообразовании сформировались после признания того, что постоянно затопленные донные субстраты характеризуются полным набором элементарных почвообразовательных процессов и обладают собственной факторной моделью развития: S_s = f(C, O, B, F, P, T, W, E) (Demas, Rabenhorst, 2001), где *C* – температурный режим климата, *O* – биота, *B* – батиметрия (глубина и морфология дна), *F* – гидродинамический режим, *P* – почвообразующая порода, *T* – время, *W* – свойства водной толщи, *E* – катастрофические (эпизодические) события (Demas, Rabenhorst, 2001). Это послужило основанием для включения субаквальных почв в международные классификационные системы Soil Taxonomy – подпорядки Wassents (порядок Entisols) и Wassists (порядок Histosols) (Soil Survey Staff, 2022), в WRB – главные квалификаторы Subaquatic и Tidalic, а также лимнический материал (limnic material) и соответствующий ему квалификатор Limnic (WRB, 2022), немецкая школа относит субгидрические почвы (Gyttja, Sapropel) к высшему таксономическому уровню (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 2005). В отечественной «Классификации и диагностике почв России» специализированные субаквальные таксоны отсутствуют, а предложенная концепция акваземов пока не получила официального статуса (Шишов и др., 2004; Ткаченко и др., 2021).

Для почв рыбоводных прудов разработаны подходы к морфологическому описанию профиля и изучены особенности накопления органического вещества, трансформации донных осадков и управления состоянием ложа

(Boyd, 1995; Munsiri et al., 1995; Avnimelech, Ritvo, 2003). Вместе с тем отсутствуют общепринятые диагностические критерии, позволяющие определить их генетическую принадлежность и положение в существующих почвенных классификациях (Meskhi et al., 2026).

Одним из ключевых вопросов генетической диагностики почв рыбоводных прудов является направленность трансформации органического вещества. Несмотря на то, что пруды и малые водохранилища рассматриваются как аккумуляторы значительного количества органического углерода (Downing et al., 2008; Boyd et al., 2010), интенсивность его накопления определяется продолжительностью эксплуатации водоема и особенностями ведения аквакультуры (Rogers et al., 2022). Осушение ложа и последующая аэрация донных отложений сопровождаются усилением процессов минерализации органического вещества и азота (Birch, 1958). Поэтому соотношение процессов аккумуляции и минерализации органического вещества может служить одним из диагностических критериев, отражающих направленность почвообразования в почвах рыбоводных прудов.

Особенно заметен этот пробел для прудовых хозяйств сухостепной зоны юга России. Почвообразование в рыбоводных прудах данной зоны определяется высокой карбонатностью почвообразующих пород, испарительной концентрацией солей, аутигенным осаждением карбонатов и периодическим чередованием восстановительных и окислительных условий при эксплуатации прудов (Zamanian et al., 2016). Эти процессы существенно отличают рассматриваемые объекты от рыбоводных прудов гумидных и тропических регионов и требуют разработки самостоятельных диагностических подходов.

Современные исследования антропогенно-преобразованных почв показывают, что изменение режима функционирования территории сопровождается перестройкой комплекса почвенных свойств, включая содержание, запасы и профильное распределение различных форм углерода (Скрипников и др., 2023, 2025). При этом характер углеродного состояния определяется не только количеством поступающего органического вещества, но и условиями его трансформации и стабилизации в почве. Для антропогенно-преобразованных почв Ростовской агломерации показана выраженная пространственная неоднородность запасов органического углерода, связанная со спецификой функционирования различных типов территорий (Skripnikov et al., 2025). В свою очередь, исследования естественных и антропогенно-

преобразованных почв свидетельствуют о комплексном характере трансформации их свойств под воздействием измененного режима функционирования территории (Сальник и др., 2025). Эти положения позволяют рассматривать почвы рыбоводных прудов как самостоятельный объект исследования, в котором чередование субаквального и субаэрального режимов может определять направленность процессов накопления и преобразования органического вещества.

Цель работы – разработать диагностические критерии и выполнить генетическую типологию почв рыбоводных прудов сухостепной зоны с определением их положения в современных почвенных классификациях.

Для достижения поставленной цели был решен ряд задач, связанных с установкой иерархии диагностических признаков почв рыбоводных прудов и определением наиболее информативных из них. Необходимым стало оценить положение исследуемых почв относительно субаквальных и субаэральных почв, разработать интегральный показатель состояния почв и на его основе выполнить их генетическую типологию. Также определить положение выделенных типов в системах классификации почв России, WRB и Soil Taxonomy.

Материалы и методы

Исследование проведено на территории прудового хозяйства, расположенного в долине суходольной балки в пределах сухостепной зоны юга Волгоградской области. Почвообразующими породами служат лессовидные суглинки. Климат территории умеренно континентальный, сухостепной, характеризуется высокой испаряемостью и выраженным дефицитом атмосферной влаги в теплый период года. Рельеф представлен слабоволнистой водораздельной равниной, расчлененной суходольной балкой, в пределах которой последовательно расположены затопляемые и периодически осушаемые элементы рыбоводного хозяйства.

Объектами исследования являлись 6 функциональных элементов территории: берег балки – зона привноса, приплощадочная территория у производственного цеха, тело дамбы, ложе спущенного пруда и ложе сухой балки – бывшие отстойные садки. Фоновая почва представлена пахотной каштановой почвой, расположенной вне зоны влияния хозяйства на расстоянии 2.77 км к северо-востоку. Согласно «Классификации и диагностике почв

России» (Шишов и др., 2004) фоновая почва относится к каштановым почвам, а по WRB (2022) – к Calcic Kastanozem (Aric).

Смешанные образцы горизонта 0–20 см отбирали методом конверта путем объединения 5 точечных проб, расположенных по углам и в центре учетной площадки. Всего проанализировано 15 смешанных образцов.

Число повторностей различалось между исследуемыми объектами. Для ложа пруда, тела дамбы и ложа сухой балки было отобрано соответственно 5, 4 и 3 смешанных образца, тогда как берег балки, площадка у производственного цеха и фоновая почва представлены единичными образцами. В связи с этим статистическая обработка количественных данных выполнялась только для объектов, имеющих полевые повторности, тогда как результаты единичных образцов использовались преимущественно для качественной интерпретации и сопоставления.

Содержание общего углерода, азота, водорода и серы определяли методом высокотемпературного каталитического сжигания в токе кислорода с хроматографическим разделением продуктов (CHNS-анализатор Eurovector EA3000). Калибровку прибора проводили по сульфаниламиду; каждую пробу анализировали в 2–3 аналитических повторностях. Содержание неорганического углерода определяли методом кислотного разложения с инфракрасной регистрацией выделяющегося CO_2 (Shimadzu TOC-L). Содержание органического углерода рассчитывали по разности между общим и неорганическим углеродом, а эквивалент $CaCO_3$ – стехиометрическим пересчетом содержания неорганического углерода.

Гранулометрический состав определяли методом лазерной дифракции после химического диспергирования и ультразвуковой дезагрегации образцов. Гранулометрические разряды по классификации Н. А. Качинского (1958) в работе не устанавливали. Эта классификация разработана для седиментометрического (пипеточного) анализа, тогда как лазерная дифракция основана на иных физических принципах, дает объемное, а не массовое распределение частиц и систематически занижает содержание тонких фракций; прямое применение к ее результатам классификаций Н. А. Качинского и USDA приводит к ошибкам в определении гранулометрического класса (Konert, Vandenberghe, 1997; Шеин и др., 2006; Федотов и др., 2007; Юдина и др., 2020; Dembovetsky et al., 2024). Поэтому данные лазерной дифракции использовали только для сравнительной оценки литологической однородности исследуемых почвенных тел, проанализированных одним методом при единой

пробоподготовке; содержание фракции <0.01 мм рассматривали как относительный показатель, а текстурный класс по USDA приводится условно.

Для генетической диагностики почв использовали 3 группы показателей:

1. Органо-генетические – содержание органического углерода, общего азота и отношение C/N;

2. Карбонатные – содержание неорганического углерода, его долю в общем углероде и эквивалент $CaCO_3$;

3. Гранулометрические – содержание фракции <0.01 мм по данным лазерной дифракции (как относительный показатель литологической однородности).

Содержание серы рассматривали как дополнительный показатель, характеризующий условия субаквального почвообразования.

Статистическую обработку данных выполняли с использованием непараметрических и параметрических методов. Межгрупповые различия оценивали критерием Краскела–Уоллиса с последующими попарными сравнениями по критерию Манна–Уитни. В качестве параметрического контроля применяли однофакторный дисперсионный анализ. При множественных сравнениях использовали поправку Бенджамини–Хохберга (Benjamini, Hochberg, 1995). Корреляционные связи оценивали коэффициентом ранговой корреляции Спирмена. Для анализа структуры взаимосвязей между показателями использовали метод главных компонент и иерархический кластерный анализ по методу Уорда.

Степень накопления или обеднения относительно фоновой почвы характеризовали коэффициентом концентрации (Кс), рассчитываемым как отношение содержания показателя в исследуемой почве к его содержанию в фоновой почве. Степень карбонатности оценивали согласно ГОСТ 27593–88.

Для комплексной оценки состояния исследуемых почв разработан интегральный органо-генетический индекс (ОГИ), учитывающий содержание органического углерода, отношение C/N и долю неорганического углерода:

$$ОГИ = Кс(Сорг) \cdot (C/N) / (C/N)ф / [1 + Снеорг / Собщ], (1)$$

где Кс(Сорг) – коэффициент концентрации органического углерода относительно фона; (C/N)/(C/N)ф – отношение C/N тела к фоновому; знаменатель учитывает долю неорганического (карбонатного) углерода и понижает индекс при ее росте.

Индекс нормировали относительно фоновой почвы, принимая ее значение за единицу. Предполагалось, что увеличение значений индекса отражает усиление процессов накопления и гумификации органического вещества, тогда как его снижение свидетельствует о преобладании процессов минерализации и относительном карбонатном обогащении. Рабочая шкала, откалиброванная по настоящей выборке, включает три градации: ОГИ отн. > 1,5 – органо-аккумулятивное состояние; 0,5–1,5 – равновесное (референтное и субаквальное); < 0,5 – минерализационное. Предлагаемый показатель рассматривается как интегральный диагностический критерий и требует дальнейшей проверки на независимых выборках.

Результаты и обсуждение

По данным лазерной дифракции все исследованные образцы попадают в текстурный класс пылеватого суглинка по USDA (фракция <0,002 мм – 14,7–26,6 %, 0,002–0,05 мм – 67,3–85,3 %, >0,05 мм – 0,0–6,1 %). С учетом занижения содержания тонких фракций лазерной дифракцией (Юдина и др., 2020) это отнесение условно; в любом случае оно не дифференцирует исследуемые почвенные тела. По шкале Н. А. Качинского содержание физической глины изменялось от 67,8 до 94,0 % (в среднем 83,2 %), соответствуя средним и тяжелым глинам. Содержание фракции <0,01 мм изменялось от 67,8 до 94,0 % (в среднем 83,2 %). Наибольшие значения отмечены в осадках сухой балки (89,5 ± 6,8 %), наименьшие – в почвах ложа пруда (76,1 ± 5,8 %). Различия между объектами были статистически значимы до введения поправки на множественные сравнения, однако после применения поправки Бенджамини–Хохберга ($p = 0,056$) статистическая значимость не сохранялась; среди попарных сравнений достоверные различия выявлены только между ложем пруда и сухой балкой (точное $U = 0$; $p = 0,036$).

Полученные результаты свидетельствуют о литологической однородности исследуемых почвенных тел, сформированных на лессовидных суглинках. Следовательно, выявленные различия в содержании органического вещества, карбонатов и других диагностических показателей могут быть интерпретированы преимущественно как следствие различий в условиях функционирования и направленности современных почвообразовательных процессов, а не гетерогенности почвообразующей породы. В связи с этим основное диагностическое значение для последующей генетической типологии приобретают показатели органического вещества. Диагностические

характеристики исследованных почвенных тел, упорядоченных по генетической оси «накопление – минерализация», приведены в табл. 1.

Таблица 1 − Диагностические показатели почвенных тел прудового хозяйства (M ± SD), упорядоченные по генетической оси

Почвенное тело (n)	C орг,, %	N, %	C/N	Доля C неорг,	S, %	$CaCO_3$, %	Фракция < 0,01 мм (ЛД), %
Берег балки (1)	3,04	0,300	10,15	0,16	0,057	4,92	86,4
Площадка у цеха (1)	1,49	0,150	9,91	0,40	<0,001	8,33	88,2
Контроль (каштановая, фон) (1)	1,21	0,130	9,31	0,19	<0,001	2,33	88,1
Тело дамбы (4)	1,18 ± 0,34	0,120 ± 0,029	9,77 ± 0,59	0,41	0,001 ± 0,001	6,73 ± 0,80	84,1 ± 5,8
Ложе пруда (5)	1,03 ± 0,49	0,118 ± 0,042	8,45 ± 1,25	0,53	0,016 ± 0,011	9,50 ± 4,64	76,1 ± 5,8
Сухая балка (садки) (3)	0,39 ± 0,14	0,063 ± 0,012	6,01 ± 1,21	0,57	0,009 ± 0,012	4,22 ± 1,91	89,5 ± 6,8

Примечание. n – число смешанных проб. Тела, представленные единичной пробой (берег балки, площадка у цеха, контроль), приведены без стандартного отклонения и носят ориентировочный характер – они не включались в статистическую обработку и используются только для качественного сопоставления. Эквивалент $CaCO_3$ – расчетная величина. ЛД – лазерная дифракция; содержание фракции <0.01 мм – относительный показатель, напрямую не сопоставимый с данными пипеточного метода.

Представленные в табл. 1 данные свидетельствуют, что исследуемые почвенные тела четко дифференцируются по показателям органического вещества, тогда как гранулометрический состав остается относительно однородным. Содержание органического углерода последовательно снижается от берега балки (3,04 %) к ложу сухой балки (0,39 ± 0,14 %). При этом почвы действующего пруда – дамбы (1,18 ± 0,34 %) и ложа (1,03 ± 0,49 %) – характеризуются содержанием органического углерода, сопоставимым с фоновой каштановой почвой (1,21 %). Практически полная корреляция между содержанием общего азота и органического углерода ($\rho = 0,99$) свидетельствует о ведущей роли органического вещества в формировании азотного фонда исследуемых почв, вследствие чего пространственное распределение азота повторяет распределение органического углерода. В отличие от этого доля неорганического углерода возрастает от 0,16–0,19 в субаэральных почвенных телах до 0,41–0,57 в объектах с субаквальной историей. Во всех исследованных образцах содержание карбонатов (в пересчете на $CaCO_3$) превышает фоновый уровень.

Диагностическая значимость отношения C/N

Критерий Краскела–Уоллиса для 3 реплицированных почвенных тел (ложе пруда, дамба и сухая балка) выявил статистически значимые различия по содержанию общего азота (p = 0,039), органического углерода (p = 0,038), отношению C/N (p = 0,020), серы (p = 0,046) и фракции <0.01 мм (p = 0,041), тогда как по содержанию неорганического углерода (p = 0.134) и фракции <0.002 мм (p = 0,917) различия отсутствовали. После введения поправки Бенджамини–Хохберга статистическую значимость в параметрическом анализе сохранило только отношение C/N (F = 10,79; p = 0,004; скорректированное p = 0,024), характеризующееся также наибольшим размером эффекта ($\varepsilon^2 \approx 0,71$). В непараметрическом анализе после поправки ни один показатель не достиг уровня статистической значимости, однако для отношения C/N получено минимальное скорректированное значение p (0,056). Отсутствие статистически значимых попарных различий, по-видимому, обусловлено ограниченным объемом выборки и несбалансированностью схемы опробования.

Несмотря на это, средние значения отношения C/N образуют последовательный монотонный ряд: дамба – 9,77, ложе пруда – 8,45, сухая балка – 6,01. Такая закономерность в сочетании со значимыми результатами омнибус-критериев и высоким размером эффекта позволяет рассматривать отношение C/N как наиболее информативный диагностический показатель среди исследованных переменных. В отличие от него различия по содержанию фракции <0,01 мм, хотя и были статистически значимы до введения поправки на множественные сравнения (F = 4,98; p = 0,035), после ее применения статистической значимости не сохраняли. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в условиях литологически однородного субстрата отношение C/N обладает более высокой диагностической ценностью, чем гранулометрические показатели.

Диагностическая информативность отношения C/N обусловлена его тесной связью с направленностью трансформации органического вещества (Тюрин, 1965; Александрова, 1980; Орлов, 1990). В процессе микробной переработки органических остатков углерод минерализуется интенсивнее, чем азот, вследствие чего отношение C/N закономерно снижается (Sørensen, 1981). В исследованных почвах значения отношения C/N изменяются от 4,77 до 10,15, что соответствует частично разложенному органическому веществу смешанного водорослево-микробного происхождения и существенно ниже значений, характерных для свежих растительных остатков (обычно более 20)

(Meyers, 1994). В пределах исследованной выборки отношение C/N отражает, по-видимому, преимущественно степень преобразования исходного органического вещества, а не смену его источников. Наиболее высокие значения, установленные на берегу балки (10,15) и в теле дамбы (9,77), соответствуют менее преобразованному органическому веществу, близкому по характеристикам к гумусу фоновой каштановой почвы. Значения 8–9, характерные для ложа пруда, отражают более активный круговорот органического вещества, тогда как значения менее 7, зарегистрированные в сухой балке (среднее 6,01, минимум 4,77), свидетельствуют о наиболее глубокой степени его минерализации (Stevenson, 1994; Романкевич, 1975).

Следует отметить, что строгое разграничение влияния состава исходного органического материала и степени его преобразования требует привлечения независимых геохимических маркеров, прежде всего изотопных ($\delta^{13}C$, $\delta^{15}N$) или молекулярно-биомаркерных исследований. Поскольку такие данные в настоящей работе отсутствуют, интерпретация отношения C/N как показателя преимущественно глубины переработки органического вещества рассматривается как наиболее вероятная, но не единственно возможная. Тем не менее именно отношение C/N наиболее последовательно отражает направленность трансформации органического вещества и может быть использовано в качестве основного диагностического критерия при генетической типологии исследованных почвенных тел.

Органический углерод

Одним из ключевых результатов исследования является отсутствие накопления органического углерода в почвах ложа действующего рыбоводного пруда по сравнению с фоновой каштановой почвой. Среднее содержание органического углерода в почвах ложа составило 1,03 ± 0,49 %, тогда как в фоновой почве – 1,21 %. Индивидуальные значения коэффициента концентрации (Кс = 0,42–1,52) свидетельствуют о значительной внутригрупповой вариабельности, однако не позволяют говорить о направленном накоплении органического вещества. Наиболее низкое содержание органического углерода установлено в почвах сухой балки, где коэффициент концентрации изменяется от 0,20 до 0,42, что соответствует снижению содержания органического углерода в 2,4–5,0 раз относительно фоновой почвы. Аналогичная закономерность выявлена и для общего азота, коэффициент концентрации которого составляет 0,38–0,54.

Полученные результаты свидетельствуют о преобладании процессов минерализации органического вещества над его накоплением. Периодическое осушение ложа пруда сопровождается аэрацией поверхностных горизонтов, что создает благоприятные условия для микробиологического разложения органического вещества и препятствует его долговременному захоронению (Birch, 1958). Вероятно, именно этим объясняется содержание органического углерода в почвах ложа, сопоставимое с фоновой каштановой почвой, а также его резкое снижение в полностью аэрируемых почвах сухой балки.

На первый взгляд полученные результаты расходятся с представлением о прудах и малых водоемах как эффективных аккумуляторах органического углерода (Downing et al., 2008; Boyd et al., 2010). Однако такое различие обусловлено особенностями исследуемого объекта. В отличие от большинства ранее изученных водоемов, характеризующихся постоянным затоплением, высокой биологической продуктивностью и дополнительным поступлением органического вещества, исследуемый рыбоводный пруд расположен в условиях сухостепного климата, функционирует в экстенсивном режиме и регулярно осушается. Известно, что эффективность долговременного захоронения органического углерода снижается по мере эксплуатации водоема и уменьшения органической нагрузки (Rogers et al., 2022), что согласуется с полученными результатами.

Следовательно, почвы ложа действующего рыбоводного пруда не обладают признаками органо-аккумулятивного режима почвообразования. Более обоснованно рассматривать их как почвы, в которых процессы поступления и минерализации органического вещества находятся в относительном динамическом равновесии. В отличие от них наиболее выраженный аккумулятивный режим установлен в почвах береговой части балки, тогда как в почвах сухой балки доминируют процессы минерализации органического вещества.

Признаки субаквальной стадии почвообразования

Содержание серы и карбонатов использовали в качестве дополнительных диагностических признаков субаквальной стадии почвообразования. В фоновой каштановой почве содержание серы находилось ниже предела обнаружения (<0,001 %), тогда как в почвах ложа пруда оно было выше (в среднем 0,016 ± 0,011 %). Наиболее вероятно, это связано с восстановительными условиями, способствующими накоплению восстановленных соединений серы в донных осадках. Вместе с тем содержание серы в большинстве образцов оставалось

близким к пределу обнаружения, а статистически значимые связи с другими показателями отсутствовали. Поэтому данный показатель рассматривался как вспомогательный диагностический признак.

Более информативным индикатором субаквальной стадии оказалось карбонатное состояние почв. Доля неорганического углерода возрастала от 0,16–0,19 в субаэральных почвенных телах до 0,41–0,57 в объектах с субаквальной историей, а среднее содержание карбонатов в почвах ложа достигало 9,50 % (максимум 17,17 %) против 2,33 % в фоновой почве. Повышенное содержание карбонатов на площадке у цеха (доля С неорг. – 0,40; $CaCO_3$ – 8,33 %), вероятно, связано с локальным техногенным поступлением карбонатного материала, что указывает на необходимость совместной интерпретации карбонатности, положения объекта в рельефе и других диагностических признаков. Вероятно, накопление карбонатов обусловлено сочетанием испарительной концентрации растворенных солей и хемогенного осаждения карбоната кальция в условиях мелководного бессточного водоема (Zamanian et al., 2016). При этом статистически значимой связи между содержанием органического и неорганического углерода не выявлено ($\rho = -0.04$), что свидетельствует об относительной независимости органического и карбонатного направлений преобразования вещества.

Высокая карбонатность исследуемых почв, по-видимому, ограничивает развитие процессов подкисления, которые могут сопровождать окисление восстановленных соединений серы при периодическом осушении ложа (Dent, Pons, 1995; Fitzpatrick et al., 2009). В результате почвы действующего пруда сохраняют сочетание признаков субаквальной стадии почвообразования и интенсивной минерализации органического вещества. В отличие от них берег балки и почвы сухой балки характеризуются преобладанием субаэральных процессов почвообразования.

Интегральный органо-генетический индекс

Расчет интегрального ОГИ по формуле (1) позволил упорядочить исследуемые почвенные тела по степени выраженности процессов накопления и минерализации органического вещества (табл. 2). За единицу принято значение фоновой каштановой почвы. Наибольшее значение получает зона привноса – берег балки (ОГИ ≈ 2,80); приплощадочное тело и тело дамбы близки к фону (1,11 и 0,87); ложе пруда смещено к нижней границе равновесного интервала (0,60); постпрудовая сухая балка опускается до минимума (0,16), то есть переходит в минерализационную градацию шкалы.

Таблица 2 − Интегральный органо-генетический индекс (ОГИ) исследованных почвенных тел

Почвенное тело (n)	Кс(Сорг)	(C/N)/(C/N)ф	Доля Снеорг	ОГИотн	Тип
Берег балки (1)	2,52	1,09	0,16	2,80	I
Площадка у цеха (1)	1,23	1,06	0,40	1,11	0
Контроль (фон) (1)	1,00	1,00	0,19	1,00	0
Тело дамбы (4)	0,98	1,05	0,41	0,87	II
Ложе пруда (5)	0,85	0,91	0,53	0,60	II
Сухая балка (садки) (3)	0,32	0,65	0,57	0,16	III

Примечание. Тела упорядочены по убыванию индекса; расчет по формуле (1) с нормированием к фону. Для тел с n = 1 значения ориентировочные и статистически не обрабатывались.

Анализ структуры индекса показывает, что сходные значения ОГИ могут формироваться за счет различных сочетаний входящих в него показателей. Для почв ложа пруда снижение индекса обусловлено совместным влиянием уменьшения отношения C/N и увеличения доли неорганического углерода, тогда как для почв сухой балки решающее значение имеет сокращение запасов органического вещества. Следовательно, ОГИ отражает не только общий уровень трансформации почвенного тела, но и различия в преобладающих механизмах этой трансформации.

Ранжирование исследуемых объектов по величине ОГИ согласуется с результатами многомерного статистического анализа. Первые две главные компоненты описывают 78,8 % общей дисперсии (PC1 – 46,4 %, PC2 – 32,4 %) и разделяют почвенные тела по соотношению органогенных и карбонатных признаков, а также по степени минерализации органического вещества. Третья компонента (14,0 %) преимущественно связана с изменчивостью содержания неорганического углерода. Иерархическая кластеризация по методу Уорда выделяет 5 устойчивых групп, лишь частично совпадающих с функциональным делением территории. При этом почвы ложа пруда и тела дамбы подразделяются на отдельные подгруппы, что, вероятно, отражает существование внутриландшафтного геохимического градиента. В целом результаты многомерного анализа хорошо согласуются с распределением значений ОГИ, подтверждая его информативность для интегральной характеристики исследуемых почвенных тел. Вместе с тем, учитывая небольшое число наблюдений и разведочный характер многомерного анализа, эти результаты следует рассматривать как подтверждающие, а не как самостоятельное доказательство предложенной схемы.

Генетическая типология и ее таксономическая привязка

Совокупность диагностических признаков, включающих отношение C/N, содержание неорганического углерода и признаки субаквальной стадии почвообразования, позволила выделить 3 генетических типа исследованных почвенных тел (рис. 1).

Тип I – органо-аккумулятивные субаэральные почвы привноса (берег балки): C/N близко к 10, органического углерода в 2,5 раза больше фона, повышено содержание серы (0,057 %), вероятно органической природы, субаквальной фазы нет; тип выделен по единичному смешанному образцу и имеет статус гипотезы, требующей подтверждения на реплицированной выборке.

Тип II – карбонатно-субаквальные почвы действующего пруда (ложе, тело дамбы): C/N 8–10, повышенное содержание карбонатов, признаки восстановительной обстановки и содержание органического углерода, сопоставимое с фоновым. Полученные результаты позволяют рассматривать эти почвенные тела как антропогенно преобразованные почвы, сохраняющие субаквальную фазу почвообразования. Существенно, что глубокая переработанность органического вещества (C/N 8–10) не означает зрелости самого почвенного тела: вещество поступает в ложе уже преобразованным и непрерывно перерабатывается, тогда как тело в целом отвечает начальной стадии почвообразования.

Тип III – минерально-деградированные постпрудовые субаэральные почвы (сухая балка): C/N ниже 7, наиболее низкое содержание органического углерода (в 2,4–5,0 раза ниже фонового) и азота при устойчивой аэрации.

Фоновая каштановая почва и почва площадки у цеха образуют референтную группу (тип 0). Почва площадки у цеха отличается от фоновой выраженным техногенно-карбонатным отпечатком (доля Снеорг 0,40) при фоновом органическом состоянии и на диаграмме располагается вблизи карбонатного порога, рядом с телом дамбы, не имея при этом субаквальных признаков, – этот случай прямо показывает необходимость совместного применения обоих диагностических критериев.

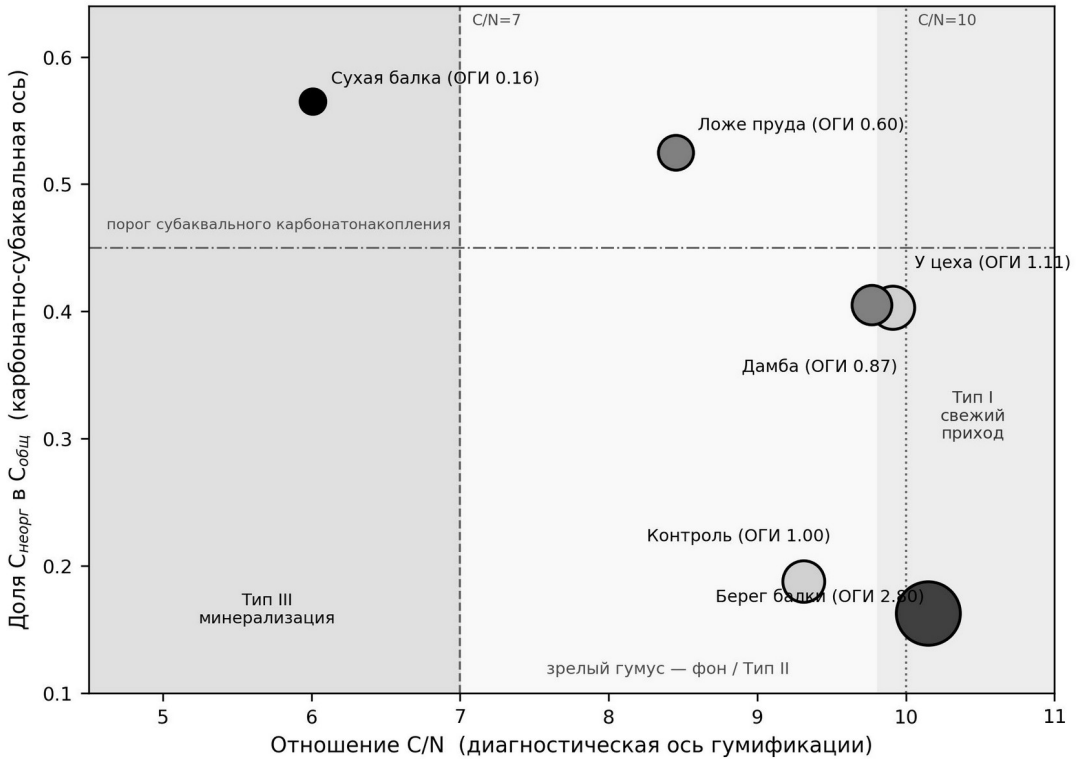


Рис. 1 – Диагностическая диаграмма «отношение C/N – доля C неорг. в C общ.» для выделенных генетических типов почвенных тел. Размер маркера пропорционален значению ОГИ. Вертикальные линии – диагностические границы стадий преобразования органического вещества (C/N = 7 и 10), горизонтальная – порог карбонатного обогащения; тела, представленные единичной пробой, показаны светлым контуром

Таксономическая интерпретация выделенных типов приведена в табл. 3. Для почв типа II наиболее близкими аналогами в системе WRB (2022) являются Gleysols с квалификаторами Subaquatic, Limnic и Gleyic; квалификатор Hyposulfidic может рассматриваться лишь предположительно, поскольку наличие сульфидных материалов в настоящей работе специально не определялось. В системе Soil Taxonomy (2022) исследуемые почвы наиболее близки к подпорядку Frasiwassents порядка Entisols. По шкале Н. А. Качинского (1958) они соответствуют средним и тяжелым глинам. Таксономическая интерпретация выделенных типов приведена в табл. 3. Названия почв по WRB (2022) даны в соответствии с правилами этой системы: главные квалификаторы указываются перед названием реферативной почвенной группы (РПГ) без скобок, дополнительные – в скобках после него. Для почв ложа действующего

пруда (тип II) наиболее близкой РПГ являются Gleysols. Из главных квалификаторов этой группы диагностируется Calcaric (карбонатный материал с содержанием $CaCO_3$-эквивалента ≥ 2 %); квалификатор Calcic неприменим, так как кальциевый горизонт требует ≥ 15 % $CaCO_3$-эквивалента. Главный квалификатор Subaquatic в WRB предполагает постоянное затопление слоем воды глубиной не более 200 см. Исследованное ложе регулярно осушается, и в момент опробования (спущенный пруд) этот критерий не выполнялся, поэтому квалификатор Subaquatic характеризует лишь фазу затопления. Из дополнительных квалификаторов применим Limnic (лимнический материал, который сохраняется на поверхности и после осушения). Таким образом, почвы ложа пруда предварительно могут быть обозначены как Calcaric Gleysol (Limnic), а в фазе затопления – как Calcaric Subaquatic Gleysol (Limnic). Дополнительный квалификатор Sulfidic в форме подквалификатора Hyposulfidic (сульфидсодержащий материал, не способный к сильному подкислению благодаря карбонатному буферу) допустим лишь предположительно, поскольку содержание неорганической сульфидной серы в работе не определялось. Для тела дамбы, сложенного перемещенным при строительстве грунтом, применим квалификатор Transportic: при наличии глеевых свойств в пределах 40 см – Calcaric Gleysol (Transportic), при их отсутствии – Calcaric Transportic Regosol. Текстурные квалификаторы (Loamic, Siltic) не устанавливали, поскольку гранулометрический состав определен методом лазерной дифракции.

Для почв типа III (постпрудовая сухая балка) наиболее близким аналогом является Calcaric Gleysol (Limnic) при сохранении реликтовых глеевых свойств в пределах 40 см, а при их утрате в условиях устойчивой аэрации – Calcaric Regosol (Limnic). Квалификатор Calcic для них также неприменим ($CaCO_3$-эквивалент 4,22 ± 1,91 %). Почвы типа I (берег балки) соответствуют Kastanozems; накопление материала склонового смыва отражается дополнительным квалификатором Solimovic (в прежних изданиях WRB – colluvic material), тогда как главный квалификатор Fluvic неприменим, поскольку материал не имеет флювиального происхождения. Главные квалификаторы для типа I без профильного описания не устанавливали. Фоновая почва диагностирована как Calcic Kastanozem (Aric).

В системе Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2022) почвы ложа действующего пруда в фазе затопления наиболее близки к большой группе Frasiwassents (подпорядок Wassents, порядок Entisols). Вместе с тем диагностика подпорядка Wassents требует положительного водного потенциала

на поверхности почвы более 21 ч в сутки ежегодно, а большой группы Frasiwassents – определенного уровня электропроводности, который в настоящей работе не измерялся. При регулярном летовании почвы ложа в фазе осушения ближе к подпорядку Aquents того же порядка.

Следует подчеркнуть, что предложенная таксономическая интерпретация основана на аналитических характеристиках поверхностного слоя (0–20 см) в пределах одного прудового хозяйства и потому носит предварительный характер. Ее окончательное подтверждение требует полного морфологического описания профилей и диагностики сульфидных материалов специализированными методами, а также проверки на примере других рыбоводных прудов сухостепной зоны.

Периодическое осушение ложа при эксплуатации рыбоводного пруда приводит к регулярному чередованию субаквальной и субаэральной стадий почвообразования. Поэтому исследованные почвы целесообразно рассматривать не как собственно субаквальные почвы, а как антропогенно преобразованные почвы, сохраняющие субаквальную фазу своего развития.

Козырев Д. А., Рудой Д. В., Горбов С. Н., Одабашян М. Ю., Поляков А. Г., Шевченко В. Н., Сальник Н. В., Диагностика и генетическая типология почв рыбоводных прудов сухостепной зоны // «Живые и биокосные системы». – 2026. – № 57; URL: https://jbks.ru/archive/issue-57/article-1; DOI: 10.18522/2308-9709-2026-57-1

Таблица 3 − Генетическая типология исследованных почвенных тел и их предварительная таксономическая интерпретация

Генетический тип	**Диагностические критерии**	**Почвенные тела**	**Близкий аналог в WRB 2022**	**Близкий аналог в Soil Taxonomy**
I. Органо-аккумулятивные субаэральные	C/N ≈ 10; Сорг > 2× фона; повышенная S; субаквальная фаза отсутствует	Берег балки (n = 1, ориентировочно)	Kastanozem (Solimovic); главные квалификаторы требуют профильной диагностики; не относятся к субаквальным почвам	Mollisols (Ustolls)
II. Карбонатно-субаквальные (инициальные)	C/N 8–10; доля Снеорг 0,41–0,53; $CaCO_3$ 7–10 %; восстановительная обстановка; Сорг на уровне фона; субаквальная фаза + летование	Ложе пруда, тело дамбы	Gleysols с ложе пруда: Calcaric Gleysol (Limnic); в фазе затопления – Calcaric Subaquatic Gleysol (Limnic); Sulfidic (Hyposulfidic) – предположительно. Тело дамбы: Calcaric Gleysol (Transportic) или, при отсутствии глеевых свойств, Calcaric Transportic Regosol	Entisols: в фазе затопления – Wassents (большая группа Frasiwassents), в фазе летования – Aquents
III. Минерально-деградированные постпрудовые	C/N < 7; обеднение Сорг (в 2,4–5,0 раза) и N; стабильная аэрация	Сухая балка (садки)	Calcaric Gleysol (Limnic) при сохранении глеевых свойств в пределах 40 см, иначе – Calcaric Regosol (Limnic) Calcic неприменим ($CaCO_3$ < 15 %)	Entisols (Aquents или Orthents – в зависимости от режима увлажнения)
0. Референтная (фон)	C/N ≈ 9–10; фоновые Сорг и N; у цеха – техногенно-карбонатный отпечаток (доля Снеорг 0,40) без субаквальных признаков	Фоновая почва, площадка у цеха	Calcic Kastanozem (Aric)	Mollisols (Ustolls)

Примечание. Таксономические соответствия предварительны и основаны на аналитических признаках слоя 0–20 см в пределах одного прудового хозяйства.

Схема генетических процессов

Calcic неприменим ($CaCO_3$ < 15 %) Полученные результаты позволяют предложить схему формирования почвенных тел рыбоводного пруда, основанную на сочетании природных и антропогенно регулируемых процессов почвообразования (рис. 2). В качестве концептуальной основы использована факторная модель субаквального почвообразования Ss = f(C, O, B, F, P, T, W, CE) (Demas, Rabenhorst, 2001), где C – температурный режим климата, O – биота, B – батиметрия, F – гидродинамический режим, P – почвообразующая порода, T – время, W – свойства водной толщи, E – катастрофические (эпизодические) события. Модель дополнена фактором периодического регулирования гидрологического режима, обусловленного эксплуатацией пруда.

В период функционирования водоема почвообразование протекает в условиях субаквальной стадии и сопровождается поступлением аллохтонного органического вещества (склоновый сток, опад, корма), его микробной трансформацией, накоплением карбонатов в результате хемогенных процессов и формированием восстановительной среды. Совокупность этих процессов определяет свойства почвенных тел, отнесенных к типу II, для которых характерны повышенная карбонатность, признаки субаквальной стадии и содержание органического вещества, близкое к фоновому.

Периодическое осушение ложа (летование) изменяет направленность почвообразовательных процессов. Аэрация осадков способствует усилению минерализации органического вещества и трансформации ранее сформированных восстановительных соединений. В исследуемом объекте развитие кислых сульфатных условий, по-видимому, ограничивается высоким содержанием карбонатов, обладающих буферными свойствами. В результате формируются почвы, характеризующиеся снижением содержания органического углерода и отношением C/N, что соответствует признакам типа III.

Почвы типа I формируются вне акватории пруда в условиях устойчивого субаэрального режима и отражают преимущественно процессы аккумуляции органического вещества, связанные со склоновым переносом и особенностями положения в рельефе.

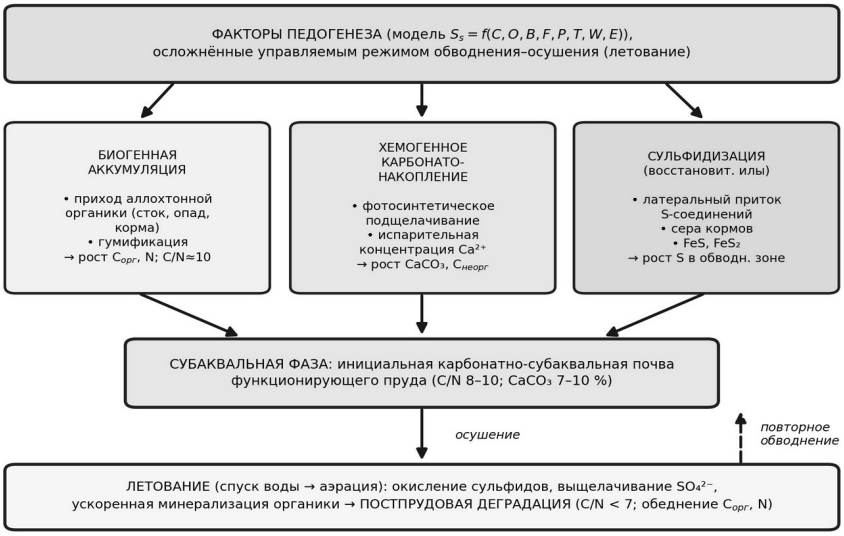


Рис. 2 − Схема генетических процессов формирования почв рыбоводных прудов: адаптация факторной модели субаквального почвообразования к управляемому водоему. Ведущий управляющий фактор – режим обводнения–осушения

Полученная схема отражает возможные направления трансформации почвенных тел в пределах исследованного прудового комплекса. При этом следует учитывать, что предложенная последовательность основана на анализе пространственного ряда и использует принцип замещения времени пространством. Поэтому она представляет собой концептуальную модель и не является реконструкцией реальной хронологической последовательности развития почв. Проверка предложенной схемы требует длительных стационарных наблюдений за одними и теми же участками в течение нескольких циклов эксплуатации пруда.

Полученные данные свидетельствуют, что ведущую роль в дифференциации почвенных тел исследуемого прудового комплекса играет режим периодического обводнения и осушения, тогда как различия гранулометрического состава имеют подчиненное значение и не объясняют наблюдаемую направленность изменений органического и карбонатного состояния почв.

Выводы

Предложенная и апробированная на полевом материале одного прудового хозяйства схема диагностики и классификации почв рыбоводных прудов

сухостепной зоны имеет методологическое назначение. Основные результаты исследования заключаются в следующем.

1. Установлено, что при литологической однородности исследуемого субстрата наибольшей диагностической информативностью обладает отношение C/N, отражающее степень преобразования органического вещества. Гранулометрический состав практически не дифференцирует исследованные почвенные тела и выполняет преимущественно роль фонового диагностического признака, подтверждающего однородность почвообразующей породы.

2. Ложе действующего пруда не является органо-аккумулятивным телом: содержание органического углерода в нем находится на уровне зональной пашни (1,03 ± 0,49 против 1,21 %), а однозначное обеднение (в 2,4–5,0 раза) свойственно только терминальной постпрудовой зоне. Карбонатное обогащение, напротив, выражено во всех телах, статистически не связано с органическим пулом ($\rho = -0{,}04$) и создает буферный резерв, препятствующий развитию кислых сульфатных условий при летовании.

3. Предложен интегральный органо-генетический индекс (ОГИ), объединяющий показатели содержания органического углерода, отношения C/N и доли неорганического углерода. Индекс позволяет интегрально оценивать направленность преобразования почвенных тел и согласуется с результатами многомерного статистического анализа.

4. На основании комплекса диагностических признаков выделены 3 генетических типа почвенных тел: органо-аккумулятивные субаэральные, антропогенные почвы с субаквальной фазой и минерально-деградированные постпрудовые. Их разграничение определяется сочетанием отношения C/N, содержания карбонатов и признаков субаквальной стадии почвообразования.

5. Выполнена предварительная таксономическая интерпретация выделенных типов в системах WRB 2022 и Soil Taxonomy и по шкале Н. А. Качинского: наиболее близким аналогом почв ложа действующего пруда является Calcaric Gleysol (Limnic), в фазе затопления – Calcaric Subaquatic Gleysol (Limnic), в Soil Taxonomy – большая группа Frasiwassents. Полученные результаты позволяют рассматривать почвы эксплуатируемых рыбоводных прудов как антропогенно преобразованные почвы, сохраняющие субаквальную фазу почвообразования. Окончательная таксономическая диагностика требует морфологического описания профилей и подтверждения диагностических

признаков в полевых условиях, а также проверки на других прудовых хозяйствах.

6. Предложена схема почвообразовательных процессов, в которой ведущим управляющим фактором становится режим обводнения и осушения, надстроенный над природными факторами субаквального педогенеза; осушенное ложе трактуется как начальное звено педогенетического ряда «субаквальная – эродированно-балочная – зональная пахотная почва», выведенного по принципу замещения времени пространством.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на расширение выборки прудовых хозяйств различных природных зон, проведение профильных морфологических исследований, проверку предложенной таксономической интерпретации, применение изотопных и молекулярно-биомаркерных методов для уточнения путей трансформации органического вещества, а также калибровку интегрального органо-генетического индекса для задач мониторинга и оценки состояния почв рыбоводных прудов.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке гранта в рамках конкурса «Наука-2030».

Список литературы

1. Александрова Л. Н. Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. Л.: Наука, 1980. 288 с.

2. ГОСТ 27593-88. Почвы. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1988. 12 с.

3. Качинский Н. А. Механический и микроагрегатный состав почвы, методы его изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 192 с.

4. Орлов Д. С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во МГУ, 1990. 324 с.

5. Романкевич Е. А. Геохимия органического вещества в океане. М.: Наука, 1975. 40 с.

6. Сальник Н. В., Тагивердиев С. С., Скрипников П. Н., Горбов С. Н., Безуглова О. С. Эколого-геохимическое состояние естественных и антропогеннопреобразованных почв селитебных территорий г. Ростов-на-

Дону // Трансформация экосистем. 2025. Т. 8. №. 3. С. 35-63. https://doi.org/10.23859/estr-240325

7. Скрипников П. Н., Горбов С. Н., Матецкая А. Ю., Тагивердиев С. С., Сальник Н. В. Особенности накопления и профильного распределения различных форм углерода в почвах парково-рекреационной зоны Ростовской агломерации //Наука Юга России.2023. Т. 19, №. 4. С. 45-52. https://doi.org/10.7868/S25000640210405

8. Скрипников П. Н., Горбов С. Н., Сальник Н. В., Тагивердиев С. С., Меженко А. А., Безуглова О. С. Исследование содержания и запасов углерода в почвах запечатанных территорий ядра Ростовской агломерации //Живые и биокосные системы. 2025. Т. 53, №. 53. https://doi.org/10.18522/2308-9709-2025-53-3

9. Ткаченко А. Н., Герасимова М. И., Лычагин М. Ю. Аквазем – почвы субаквальных мелководий устьевых областей рек // Почвоведение. 2021. № 7. С. 773–784.

10. Тюрин И. В. Органическое вещество почв и его роль в плодородии. М.: Наука, 1965. 320 с.

11. Федотов Г. Н., Шеин Е. В., Путляев В. И., Архангельская Т. А., Елисеев А. В., Милановский Е. Ю. Физико-химические основы различий седиментометрического и лазерно-дифракционного методов определения гранулометрического состава почв // Почвоведение. 2007. № 3. С. 310–317.

12. Шеин Е. В., Милановский Е. Ю., Молов А. З. Гранулометрический состав: роль органического вещества в различиях данных седиментометрического и лазерно-дифракционного методов // Доклады по экологическому почвоведению. 2006. Т. 1, № 1. С. 17–30.

13. Шишов Л. Л., Тонконогов В. Д., Лебедева И. И., Герасимова М. И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

14. Юдина А. В., Фомин Д. С., Валдес-Коровкин И. А., Чурилин Н. А., Александрова М. С., Головлева Ю. А., Филиппов Н. В., Ковда И. В., Дымов А. А., Милановский Е. Ю. Пути создания классификации почв по гранулометрическому составу на основе метода лазерной дифракции // Почвоведение. 2020. № 11. С. 1353–1371. https://doi.org/10.31857/S0032180X20110143

15. Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden. Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5). 5. Aufl. Hannover: Schweizerbart, 2005. 438 S.

16. Avnimelech Y., Ritvo G. Shrimp and fish pond soils: processes and management // Aquaculture. 2003. Vol. 220, № 1–4. P. 549–567. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00641-5

17. Benjamini Y., Hochberg Y. Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing // Journal of the Royal Statistical Society. Series B. 1995. Vol. 57, № 1. P. 289–300. https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x

18. Birch H. F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability // Plant and Soil. 1958. Vol. 10, № 1. P. 9–31. https://doi.org/10.1007/BF01343734

19. Boyd C. E. Bottom soils, sediment, and pond aquaculture. New York: Chapman and Hall, 1995. 348 p.

20. Boyd C. E., Wood C. W., Chaney P. L., Queiroz J. F. Role of aquaculture pond sediments in sequestration of annual global carbon emissions // Environmental Pollution. 2010. Vol. 158, № 8. P. 2537–2540. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.04.025

21. Demas G. P., Rabenhorst M. C. Factors of subaqueous soil formation: a system of quantitative pedology for submersed environments // Geoderma. 2001. Vol. 102, № 3–4. P. 189–204. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00111-7

22. Dembovetsky A. V., Tyugai Z. N., Shein E. V. The granulometric composition of soils: history, development of methods, current state, and prospects // Moscow University Soil Science Bulletin. 2024. Vol. 79, № 4. P. 387–392. https://doi.org/10.3103/S0147687424700364

23. Dent D. L., Pons L. J. A world perspective on acid sulphate soils // Geoderma. 1995. Vol. 67, № 3–4. P. 263–276. https://doi.org/10.1016/0016-7061(95)00013-E

24. Downing J. A., Cole J. J., Middelburg J. J. et al. Sediment organic carbon burial in agriculturally eutrophic impoundments over the last century // Global Biogeochemical Cycles. 2008. Vol. 22, № 1. GB1018. https://doi.org/10.1029/2006GB002854

25. Fitzpatrick R. W., Shand P., Merry R. H. Acid sulfate soils // Regolith Science. Collingwood: CSIRO Publishing, 2009. P. 65–111.

26. Konert M., Vandenberghe J. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction // Sedimentology. 1997. Vol. 44, № 3. P. 523–535. https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.1997.d01-38.x

27. Meskhi B., Rudoy D., Gorbov S., Polyakov A., Odabashyan M., Mirzoyan A., Studennikova S., Kozyrev D. Classification of fishpond soils in soil classification systems // Soil Systems. 2026. Vol. 10, № 7. Art. 67. https://doi.org/10.3390/soilsystems10070067

28. Meyers P. A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter // Chemical Geology. 1994. Vol. 114, № 3–4. P. 289–302. https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90059-0

29. Munsiri P., Boyd C. E., Hajek B. F. Physical and chemical characteristics of bottom soil profiles in ponds at Auburn, Alabama, USA, and a proposed system for describing pond soil horizons // Journal of the World Aquaculture Society. 1995. Vol. 26, № 4. P. 346–377. https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1995.tb00831.x

30. Rogers M. N., Williamson T. J., Knoll L. B., Vanni M. J. Temporal and spatial variation in sediment organic carbon burial across a reservoir landscape // Biogeochemistry. 2022. Vol. 159, № 1. P. 87–102. https://doi.org/10.1007/s10533-022-00916-w

31. Skripnikov P. N., Gorbov S. N., Bezuglova O. S., Mezhenkov A. A., Tagiverdiev S. S., Salnik N. V., Matetskaya A. Y. Estimation of organic carbon stocks in the urban soils of the Rostov agglomeration // Eurasian Soil Science. 2025. Vol. 58, №. 5. P. 1-10. https://doi.org/10.1134/S1064229324603871

32. Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy. 13th ed. Washington: USDA – Natural Resources Conservation Service, 2022. 402 p.

33. Sørensen L. H. Carbon–nitrogen relationships during the humification of cellulose in soils containing different amounts of clay // Soil Biology and Biochemistry. 1981. Vol. 13, № 4. P. 313–321. https://doi.org/10.1016/0038-0717(81)90068-7

34. Stevenson F. J. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. 2nd ed. New York: Wiley, 1994. 496 p.

35. World Reference Base for Soil Resources 2022. 4th ed. Vienna: International Union of Soil Sciences, 2022. 236 p.

36. Zamanian K., Pustovoytov K., Kuzyakov Y. Pedogenic carbonates: forms and formation processes // Earth-Science Reviews. 2016. Vol. 157. P. 1–17. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.03.003

References

1. Alexandrova L. N. The organic matter of the soil and the processes of its transformation. L.: Nauka, 1980. 288 p. (in Rus)

2. GOST 27593-88. Soils. Terms and definitions. Moscow: Publishing House of Standards, 1988. 12 p. (in Rus)

3. Kachinsky N. A. Mechanical and microaggregate composition of soil, methods of its study. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1958. 192 p. (in Rus)

4. Orlov D. S. Humic acids of soils and the general theory of humification. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 1990. 324 p. (in Rus)

5. Romankevich E. A. Geochemistry of organic matter in the ocean. Moscow: Nauka Publ., 1975. 40 p. (in Rus)

6. Salnik, N.V., Tagiverdiev, S.S., Skripnikov, P.N., Gorbov, S.N., and Bezuglova, O.S. Ecological and Geochemical State of Natural and Anthropogenically Transformed Soils in Residential Areas of Rostov-on-Don. Transformation of Ecosystems, 2025, vol. 8, no. 3, pp. 35–63. https://doi.org/10.23859/estr-240325

7. Skripnikov, P.N., Gorbov, S.N., Matetskaya, A.Yu., Tagiverdiev, S.S., and Salnik, N.V. Patterns of Accumulation and Profile Distribution of Different Forms of Carbon in Soils of the Park and Recreational Zone of the Rostov Agglomeration. Science of the South of Russia, 2023, vol. 19, no. 4, pp. 45–52. https://doi.org/10.7868/S25000640210405 (in Rus)

8. Skripnikov, P.N., Gorbov, S.N., Salnik, N.V., Tagiverdiev, S.S., Mezhenko, A.A., and Bezuglova, O.S. Study of Carbon Content and Stocks in Soils of Sealed Areas in the Core of the Rostov Agglomeration. Living and Non-Living Systems, 2025, vol. 53, no. 53. https://doi.org/10.18522/2308-9709-2025-53-3 (in Rus)

9. Tkachenko A. N., Gerasimova M. I., Lychagin M. Yu. Aquazems – soils of subaqueous shallow waters in river mouth areas // Pochvovedenie. 2021. No. 7. P. 773-784. (in Rus)

10. Tyurin I. V. Soil organic matter and its role in fertility. Moscow: Nauka, 1965. 320 p. (in Rus)

11. Fedotov G. N., Shein E. V., Putlyaev V. I., Arkhangel'skaya T. A., Eliseev A. V., Milanovskii E. Yu. Physicochemical bases of differences between the

sedimentometric and laser-diffraction techniques of soil particle-size analysis // Eurasian Soil Science. 2007. Vol. 40, № 3. P. 281–289. https://doi.org/10.1134/S1064229307030064

12. Shein E. V., Milanovskii E. Yu., Molov A. Z. Particle-size distribution: the role of organic matter in the differences between the data of sedimentometric and laser-diffraction methods // Doklady po ekologicheskomu pochvovedeniyu. 2006. Vol. 1, № 1. P. 17–30. (in Rus)

13. Shishov L. L., Tonkonogov V. D., Lebedeva I. I., Gerasimova M. I. Classification and diagnostics of soils in Russia. Smolensk: Oikumena, 2004. 342 p. (in Rus)

14. Yudina A. V., Fomin D. S., Valdes-Korovkin I. A., Churilin N. A., Aleksandrova M. S., Golovleva Yu. A., Phillipov N. V., Kovda I. V., Dymov A. A., Milanovskiy E. Yu. The ways to develop soil textural classification for laser diffraction method // Eurasian Soil Science. 2020. Vol. 53, № 11. P. 1579–1595. https://doi.org/10.1134/S1064229320110149

15. Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden. Bodenkundliche Kartieranleitung (KA5). 5. Aufl. Hannover: Schweizerbart, 2005. 438 S.

16. Avnimelech Y., Ritvo G. Shrimp and fish pond soils: processes and management // Aquaculture. 2003. Vol. 220, № 1–4. P. 549–567. https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00641-5

17. Benjamini Y., Hochberg Y. Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing // Journal of the Royal Statistical Society. Series B. 1995. Vol. 57, № 1. P. 289–300. https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x

18. Birch H. F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability // Plant and Soil. 1958. Vol. 10, № 1. P. 9–31. https://doi.org/10.1007/BF01343734

19. Boyd C. E. Bottom soils, sediment, and pond aquaculture. New York: Chapman and Hall, 1995. 348 p.

20. Boyd C. E., Wood C. W., Chaney P. L., Queiroz J. F. Role of aquaculture pond sediments in sequestration of annual global carbon emissions // Environmental Pollution. 2010. Vol. 158, № 8. P. 2537–2540. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.04.025

21. Demas G. P., Rabenhorst M. C. Factors of subaqueous soil formation: a system of quantitative pedology for submersed environments // Geoderma. 2001. Vol. 102, № 3–4. P. 189–204. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00111-7

22. Dembovetsky A. V., Tyugai Z. N., Shein E. V. The granulometric composition of soils: history, development of methods, current state, and prospects // Moscow University Soil Science Bulletin. 2024. Vol. 79, № 4. P. 387–392. https://doi.org/10.3103/S0147687424700364

23. Dent D. L., Pons L. J. A world perspective on acid sulphate soils // Geoderma. 1995. Vol. 67, № 3–4. P. 263–276. https://doi.org/10.1016/0016-7061(95)00013-E

24. Downing J. A., Cole J. J., Middelburg J. J. et al. Sediment organic carbon burial in agriculturally eutrophic impoundments over the last century // Global Biogeochemical Cycles. 2008. Vol. 22, № 1. GB1018. https://doi.org/10.1029/2006GB002854

25. Fitzpatrick R. W., Shand P., Merry R. H. Acid sulfate soils // Regolith Science. Collingwood: CSIRO Publishing, 2009. P. 65–111.

26. Konert M., Vandenberghe J. Comparison of laser grain size analysis with pipette and sieve analysis: a solution for the underestimation of the clay fraction // Sedimentology. 1997. Vol. 44, № 3. P. 523–535. https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.1997.d01-38.x

27. Meskhi B., Rudoy D., Gorbov S., Polyakov A., Odabashyan M., Mirzoyan A., Studennikova S., Kozyrev D. Classification of fish pond soils in soil classification systems // Soil Systems. 2026. Vol. 10, № 7. Art. 67. https://doi.org/10.3390/soilsystems10070067

28. Meyers P. A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter // Chemical Geology. 1994. Vol. 114, № 3–4. P. 289–302. https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90059-0

29. Munsiri P., Boyd C. E., Hajek B. F. Physical and chemical characteristics of bottom soil profiles in ponds at Auburn, Alabama, USA, and a proposed system for describing pond soil horizons // Journal of the World Aquaculture Society. 1995. Vol. 26, № 4. P. 346–377. https://doi.org/10.1111/j.1749-7345.1995.tb00831.x

30. Rogers M. N., Williamson T. J., Knoll L. B., Vanni M. J. Temporal and spatial variation in sediment organic carbon burial across a reservoir landscape //

Biogeochemistry. 2022. Vol. 159, № 1. P. 87–102. https://doi.org/10.1007/s10533-022-00916-w

31. Skripnikov P. N., Gorbov S. N., Bezuglova O. S., Mezhenkov A. A., Tagiverdiev S. S., Salnik N. V., Matetskaya A. Y. Estimation of organic carbon stocks in the urban soils of the Rostov agglomeration // Eurasian Soil Science. 2025. Vol. 58, №. 5. P. 1-10. https://doi.org/10.1134/S1064229324603871

32. Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy. 13th ed. Washington: USDA – Natural Resources Conservation Service, 2022. 402 p.

33. Sørensen L. H. Carbon–nitrogen relationships during the humification of cellulose in soils containing different amounts of clay // Soil Biology and Biochemistry. 1981. Vol. 13, № 4. P. 313–321. https://doi.org/10.1016/0038-0717(81)90068-7

34. Stevenson F. J. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. 2nd ed. New York: Wiley, 1994. 496 p.

35. World Reference Base for Soil Resources 2022. 4th ed. Vienna: International Union of Soil Sciences, 2022. 236 p.

36. Zamanian K., Pustovoytov K., Kuzyakov Y. Pedogenic carbonates: forms and formation processes // Earth-Science Reviews. 2016. Vol. 157. P. 1–17. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.03.003

DIAGNOSTICS AND GENETIC TYPOLOGY OF DRY-STEPPE FISH-POND SOILS

Kozyrev D. A.[1*], Rudoy D. V.[1], Gorbov S. N.[2], Odabashyan M. Yu.[1], Polyakov A. G.[1], Shevchenko V. N.[1], Salnik N. V.[2]

[1]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

[2]Sirius University of Science and Technology, Sirius Federal Territory, Russia

dinis.kozyrev@bk.ru*, rudoy.d@gs.donstu.ru, gorbow@mail.ru, modabashyan@donstu.ru, ag.polyakov@mail.ru, vikakhorosheltseva@gmail.com, n.salnik.w@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-1202-6622, 0000-0002-1916-8570, 0000-0002-0174-1631, 0000-0002-3371-0098, 0009-0001-2163-1683, 0000-0002-5001-4959, 0000-0001-7840-365X

Abstract

A classification-diagnostic scheme for dry-steppe fish-pond soils is proposed, based on pedogenetic criteria rather than on the level of geochemical loading. Using six functional-morphological soil bodies of a pond farm (fifteen composite samples, three bodies replicated), the C/N ratio is shown to be the most consistent discriminator on a lithologically uniform substrate ($H = 7{,}81$, $P = 0{,}020$; $F = 10{,}79$, $P = 0{,}004$; $\varepsilon^2 \approx 0{,}71$). The bed of the operating pond is not enriched in organic carbon relative to the zonal arable soil, whereas carbonate enrichment occurs in every body and is statistically decoupled from the organic pool ($\rho = -0{,}04$). An integral organo-genetic index (OGI) and a three-member genetic typology are developed: organo-accumulative, carbonate-subaqueous and mineral-degraded soils. The substrates of the operating pond are referred to anthropogenic soils with a subaqueous phase at an initial stage of development and provisionally correlated with WRB 2022 and Soil Taxonomy taxa. The scheme is based on a single pond farm and requires verification on other ponds.

Keywords

subaqueous pedogenesis; carbonate accumulation; pond drying; humification; organic-matter mineralisation; integral index; anthropogenic soil; Kastanozems.

Козырев Д. А., Рудой Д. В., Горбов С. Н., Одабашян М. Ю., Поляков А. Г., Шевченко В. Н., Сальник Н. В., Диагностика и генетическая типология почв рыбоводных прудов сухостепной зоны // «Живые и биокосные системы». – 2026. – № 57; URL: https://jbks.ru/archive/issue-57/article-1; DOI: 10.18522/2308-9709-2026-57-1

Статья поступила в редакцию 4 августа 2026 г.
Поступила после доработки 21 августа 2026 г.
Принята к печати 17 сентября 2026 г.
Received 4, August, 2026
Revised 21, August, 2026
Accepted 17, September, 2026

Козырев Д. А., Рудой Д. В., Горбов С. Н., Одабашян М. Ю., Поляков А. Г., Шевченко В. Н., Сальник Н. В., Диагностика и генетическая типология почв рыбоводных прудов сухостепной зоны // «Живые и биокосные системы». – 2026. – № 57; URL: https://jbks.ru/archive/issue-57/article-1; DOI: 10.18522/2308-9709-2026-57-1