
ГЕНЕЗИС И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 631.48

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ И БАЗОВЫЙ УРОВЕНЬ
ОРГАНИЗАЦИИ НАЗЕМНОГО МОНИТОРИНГА
СОДЕРЖАНИЯ И ЗАПАСОВ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА
В ПАХОТНЫХ СВЕТЛО-КАШТАНОВЫХ ПОЧВАХ,
ВОЛГОГРАДСКАЯ ОБЛАСТЬ

© 2024 г. Н. Б. Хитров^{a,*} (<https://orcid.org/000-0001-5151-5109>), И. Н. Горохова^a,
В. В. Иванова^a, Е. И. Кравченко^a (<https://orcid.org/0000-0003-4609-5650>),
Н. Г. Круглякова^{a, b}, Л. В. Роговнева^a,
Д. И. Рухович^a (<https://orcid.org/0000-0002-8002-0698>)

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

^bВсероссийский научно-исследовательский институт орошаемого земледелия –
филиал Федерального научного центра гидротехники и мелиорации имени А. Н. Костякова,
ул. им. Тимирязева, 9, Волгоград, 400002 Россия

*e-mail: khitrovn@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.06.2024 г.

После доработки 18.06.2024 г.

Принята к публикации 26.07.2024 г.

Для тестового полигона мониторинга на территории опытной станции “Орошаляемая” в Волгоградской области (Россия) на юге Приволжской возвышенности представлены числовые значения оценок базового уровня содержания, запасов органического углерода (C_{opr}), плотности почв, показателей их пространственного варьирования и дифференцированного вертикального распределения в пределах слоя 0–40 см, охватывающего весь гумусовый слой. Указанные показатели характеризуют пашню в севообороте на богаре и на орошении и 50-летнюю залежь на семи динамических площадках со светло-каштановыми почвами, имеющими два типа строения профиля: Р–ВМК–ВСAnc (агрокаштановыми почвами) и Рса–ВСAnc (агроземами аккумулятивно-карбонатными) среднесуглинистыми на палево-бурых опесчененных суглинках (Haplic Kastanozem (Loamic, Aric)). Для выбора объектов мониторинга были использованы карта коэффициентов мультивременной линии почв, ретроспективный анализ данных дистанционного зондирования за 40 лет и почвенное обследование. Каждая динамическая площадка 30 × 30 м представлена девятью индивидуальными точками с дифференцированным отбором образцов по глубине тонкими слоями по 5 или 10 см. Коэффициент вариации в пространстве увеличивается от 5–10 до 30–40% по мере увеличения глубины слоя. На пашне обосновано равномерное вертикальное распределение содержания C_{opr} в пределах пахотного слоя. На залежи восстанавливается аккумулятивный тип вертикального распределения с максимумом C_{opr} возле поверхности в светлогумусовом постагрогенном горизонте с дерниной. Полученные оценки содержания и запасов C_{opr} сопоставимы с имеющимися материалами по светло-каштановым почвам междуречья Волги и Дона. Выбранные объекты являются представительными для ведения мониторинга. Для слоя 0–30 см минимальная значимая разность запасов C_{opr} в среднем составляет 3.4 т/га при вариации от 2.7 до 4.6 т/га. На сравнение запасов C_{opr} разных динамических площадок существенное влияние оказывает вертикальное распределение плотности почвы, зависящее от антропогенных воздействий.

Ключевые слова: агрокаштановые почвы, агроzemы аккумулятивно-карбонатные, богара, орошение, залежь, солонцеватые почвы

DOI: 10.31857/S0032180X24120028, **EDN:** JDWGHP

ВВЕДЕНИЕ

В последнее столетие на основе регулярных метеорологических наблюдений регистрируют повышение средней глобальной температуры воздуха и изменение климата Земли [8, 22, 24]. Среди большого числа причин, влияющих на климат, регистрируемые изменения климата многие исследователи объясняют увеличением концентрации парниковых газов (CO_2 , CH_4 , окислов азота) в атмосфере [19, 59], которое через глобальный цикл углерода, затрагивает все остальные компоненты геосистемы: гидросферу, литосферу, биосферу, педосферу, а в современных условиях и техносферу. В связи с этим появилась заинтересованность мирового сообщества в низкоуглеродном развитии экономики. В настоящее время результаты мониторинга климатически активных веществ в атмосфере на территории Российской Федерации, осуществляемого Росгидрометом, систематизируются в Национальном кадастре антропогенных выбросов [27]. По распоряжению правительства ведется разработка системы мониторинга и учета данных о потоках парниковых газов и углеродного цикла в наземных экосистемах Российской Федерации.

В мировой практике и научных исследованиях для оценки изменения содержания и запасов C_{opr} в почвах используют несколько подходов [87]: (1) длительные полевые опыты (long-term terrestrial soil experiments) [13, 32, 33, 64, 65, 77]; (2) хроноряды [3, 7, 18, 31, 34, 45–47, 56, 67]; (3) парные сравнения видов землепользования [44, 54, 73, 74]; (4) сети мониторинга [21, 62, 69, 71, 88]; (5) моделирование процессов преобразования органических веществ в почве [25, 26, 30, 50, 46, 61]; (6) цифровые методы картографирования [66, 70, 72, 75, 79, 80, 83].

Выполнено несколько обзоров с метаанализом влияния изменения вида использования земель или разных технологий возделывания культур на содержание и запасы C_{opr} в почвах [43, 48, 54, 55, 58, 68, 89, 91].

Согласно протоколу для измерения, мониторинга, доклада и верификации содержания почвенного органического углерода (C_{opr}) в агроландшафтах [52], считается необходимым оценивать изменение содержания C_{opr} в почве на основе прямого отбора образцов почвы и химического определения C_{opr} в них в разные сроки. Для почв характерна изменчивость C_{opr} в пространстве и во времени [40]. Существующие оценки многолетнего тренда изменения C_{opr} в почвах обычно находятся в пределах до 0.07 абс. %/год по содержанию C_{opr} и до 0.5 т/(га год) по запасам C_{opr} [25, 33, 49, 50, 53]. Величина годового прироста содержания C_{opr} в почве сопоставима или меньше аналитической воспроизводимости используемых методов, заметно меньше амплитуды сезонной динамики и еще меньше по сравнению с пространственной вариабельностью

рассматриваемых показателей [40]. Следствием этого положения является необходимость создания сети закрепленных в пространстве динамических площадок небольшого размера, предназначенных для последовательного накопления хронологического ряда данных о содержании и запасах C_{opr} на основе периодического отбора образцов почвы, учитывающего пространственную изменчивость измеряемых показателей.

Сравнение потенциального изменения содержания и запасов C_{opr} во времени с возможностью их обоснования прямыми наземными измерениями приводит к заключению о целесообразности повторных измерений C_{opr} на тех же динамических площадках с периодичностью минимум 5 лет, в идеале 10–20 лет [40, 84–86].

Почвы сухостепной подзоны, представленные каштановыми солонцовыми комплексами и массивами солонцеватых и несолонцеватых темно-каштановых, каштановых и светло-каштановых почв, выделяемых в классификации почв СССР [12], широко используются в сельском хозяйстве, в том числе в пашне. Солонцы и солонцеватые почвы обладают свойствами, снижающими плодородие почв и урожайность выращиваемых культур. Во второй половине XX в. были разработаны и применены на больших территориях приемы мелиорации солонцовых комплексов. Это привело к заметному преобразованию почвенного покрова. В классификации почв России [11, 23] был создан подход, позволяющий учитывать степень антропогенного преобразования разных почв. Он основан на выделении особых агрогоризонтов, наряду с природными разными гумусовыми горизонтами, и общем изменении строения почвенного профиля. По отношению к солонцам в классификации почв России [11, 23] предусмотрены как природные типы, так и несколько типов агросолонцов, а также агроземы солонцовые. Для каштановых почв, выделяемых в классификации почв СССР [12], в классификации почв России [11, 23] был предусмотрен только природный тип “каштановые” со светло-гумусовым (AJ), ксерометаморфическим (ВМК) и аккумулятивно-карбонатным горизонтами в отделе аккумулятивно-карбонатных малогумусных почв. При этом считалось, что “Среди почв отдела не выделяются агропочвы, поскольку при распашке естественных почв их верхние диагностические горизонты трансформируются в агрогоризонты, и почвы относятся к отделу агроземов” [11, с. 156; 23, с. 99]. В действительности в ходе полевых исследований неоднократно отмечалось [63], что на пашне часто встречаются два типа почвенных профилей Р–ВМК–ВСАнс и Рса–ВСАнс, которые по классификации почв СССР [12] относятся к светло-каштановым пахотным почвам. Второй из них (Рса–ВСАнс), в строгом соответствии с классификацией почв России [11, 23], является агроземом

аккумулятивно-карбонатным. А первый (Р-ВМК-BCAnс), в соответствии с логикой этой классификации [11], следует относить к агрокаштановым почвам, что не было предусмотрено в первых двух версиях [11, 23]. Указанные изменения планируется отразить в следующем издании классификации.

Цель работы – представить методические подходы организации наземного мониторинга и результаты оценки базового (начального) уровня содержания и запасов $C_{оп}$ на семи динамических площадках в агрокаштановых почвах и агроземах аккумулятивно-карбонатных в условиях многолетней залежи и пашни на богаре и при орошении на опытной станции “Орошаемая” в Волгоградской области.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являются почвы и сельскохозяйственные угодья опытной станции “Орошаемая” – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения Федеральный научный центр гидротехники и мелиорации имени А.Н. Костякова (рис. 1). Общая площадь землепользования – 3644 га, из которых сельскохозяйственные угодья занимают 3552 га. Площадь пахотных земель – 2575 га, в составе которых 1379 га орошаемых [57]. С 1967 по 2021 гг. территория считалась опытно-производственным хозяйством Всероссийского научно-исследовательского института орошаемого земледелия (ВНИИОЗ).

Агроклиматические ресурсы территории характеризуются недостаточностью увлажнения, высокой температурой воздуха и почвы, сильными ветрами. По агроклиматическому районированию Волгоградской области опытная станция относится к очень теплому району резко засушливой области IIIb [35], по классификации Кёппена–Гейгера [76] – класс Dfa. Среднегодовая температура воздуха колеблется в пределах +7.6...+8.5°C, минимальная среднемесячная температура в январе –9.6°C, максимальные – в июле–августе составляют +24.8°C. Сумма осадков за год за последние 5 лет: среднее – 404 мм, максимальное – 484 мм; минимальное – 311 мм; за последние 30 лет: среднее – 395 мм; максимальное – 580 мм; минимальное – 250 мм. Сумма осадков за вегетационный период за последние 5 лет: 227 мм; максимальное – 241 мм, минимальное – 176; за последние 30 лет: 218 мм; максимальное – 424 мм, минимальное – 89 мм. Коэффициент увлажнения в среднем за последние 5 лет 0.33 и 30 лет – 0.39; гидротермический коэффициент Селянинова в среднем за последние 5 лет – 0.45, за последние 30 лет – 0.48. Годовая сумма температур выше 5°C за последние 5 лет – 4116°C, за последние 30 лет – 3930°C; годовая сумма температур выше 10°C за последние 5 лет – 3830°C, за последние 30 лет – 3650°C.

Опытная станция “Орошаемая” расположена на юго-западном склоне Приволжской возвышенности в 18–20 км к западу от Волгограда. Южная граница земель хозяйства примыкает к Волго-Донскому судоходному каналу между Варваровским и Береславским водохранилищами.

В геоморфологическом отношении земли хозяйства размещены в Приволжской возвышенной провинции, где в составе аккумулятивно-денудационной южной ее части выделяется Юго-Западный подрайон низких плато и террас с плоскогористым рельефом. Именно в этой части плосковыпуклые водоразделы переходят в склоны долины р. Червлена (в настоящее время – меандры этой реки, затоплены водами Варваровского и Береславского водохранилищ Волго-Донского судоходного канала) и балок Песчаная и Карповка (рис. 1b).

В литологическом отношении территория неоднородна. Почвообразующими породами являются преобладающие палево-бурые четвертичные опесчаненные суглинки с линзами песка и супеси на глубине 1.5–3 м, разные двучленные отложения, представленные указанными выше суглинками, подстилаемыми с 50–120 см песками разного цвета и карбонатности, супесями и слоистыми песчано-суглинистыми отложениями, а также выходящими на дневную поверхность щебнисто-суглинисто-песчаными и щебнисто-суглинистыми отложениями с фрагментами опоки [6, 9].

Территория опытной станции относится к субхолодной природной зоне с развитием светло-каштановых солонцовых комплексов на водораздельных склоновых поверхностях, большая часть которых используется в сельском хозяйстве [6, 10].

На орошаемых землях хозяйства применялись четырех-, пяти-, шести-, семи- и восьмипольные схемы севооборотов зерно-кормового направления [5, 17, 36]. Они включали озимую пшеницу, люцерну нескольких лет жизни, яровую пшеницу, озимую пшеницу + горохово-подсолнечниковую смесь, кукурузу на силос. На богарных землях возделывают озимую пшеницу, яровой ячмень, судансскую траву, подсолнечник, используют черный пар.

Согласно архивной почвенной карте масштаба 1:25 000, составленной ГИПРОЗЕМом в 1976 г., преобладающими были светло-каштановые солонцеватые и несолонцеватые суглинистые почвы в комплексе с каштановыми степными солонцами на водоразделе и склонах, луговато- и лугово-каштановыми почвами в западинах и ложбинах; в лощинах и отвершках балок – комплексы намытых почв, в долине Балки Песчаной – аллювиальные почвы. В течение последнего полувека почвенный покров подвергся преобразованию под влиянием испытания и эксплуатации разных способов и техники

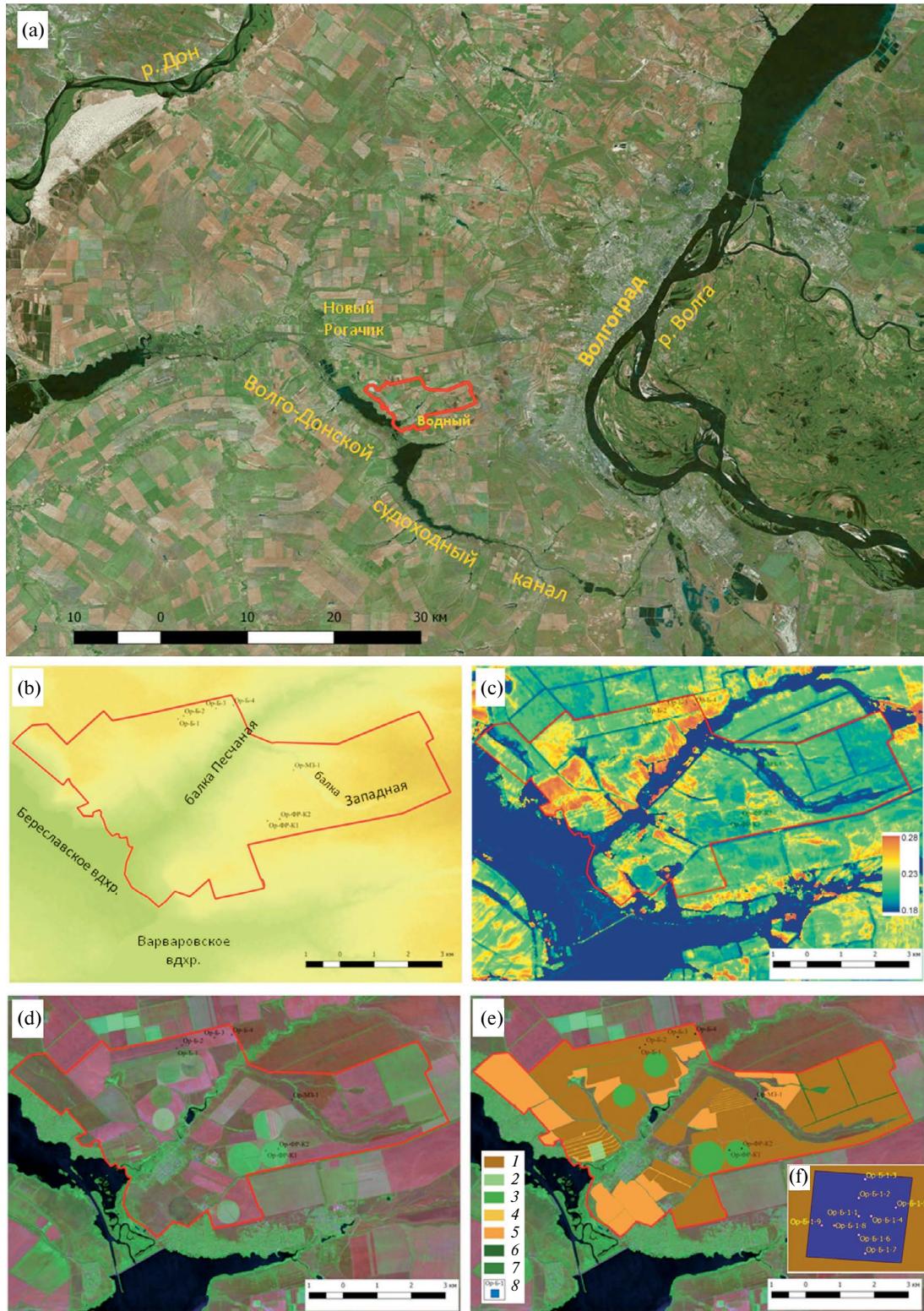


Рис. 1. Положение тестового полигона и динамических площадок: (а) – границы опытной станции “Орошаемая” (красная линия); (б) – рельеф SRTM; (с) – карта коэффициента C мультивременной линии почв; (д) – космический снимок Sentinel 13.08.2019 г.; (е) – схема сельскохозяйственных угодий в 2023 г.: 1 – пашня, богара; 2 – пашня, орошение, опытные участки; 3 – пашня, орошение, дождевальные машины “Фрегат”, производственные посевы; 4 – разного рода разделители на полях; 5 – залежь; 6 – лесополосы; 7 – тростники; 8 – динамическая площадка и ее номер; (ф) – пример расположения и номера индивидуальных точек опробования на динамической площадке.

орошения и сопутствующих агротехнических и мелиоративных воздействий. В текущее время основной способ орошения – дождевание “Фрегатами” или дождевальными установками барабанного типа. Большая часть территории опытной станции представлена пашней. По классификации почв СССР [12] к указанным выше названиям почв добавляются определения: “пахотная”, “орошаемая”, “смытая”. Современный почвенный покров представлен почвенными комбинациями в виде вариаций, вариаций-сочетаний, мозаик и комплексов, которые, согласно логике построения классификации почв России [11], включают агрокаштановые солонцеватые почвы, агроземы аккумулятивно-карбонатные солонцеватые и несолонцеватые, агроземы глинисто-иллювиальные, агросолонцы, агроземы без срединных горизонтов, а также стратоземы и разные стратифицированные (намытые, насыпаные или натащенные) почвы в разных соотношениях. По международной классификации WRB [60] это Haplic or Luvic Kastanozem (Aric, Loamic), Haplic Solonetz (Aric, Loamic, Cutanic).

Оценка базового уровня мониторинга содержания, запасов органического углерода и характеристик их варьирования в пространстве и по глубине в почвах сельскохозяйственных угодий осуществлена на серии динамических площадок. Основное назначение динамических площадок – получение локальных оценок изменения содержания и запасов органического углерода во времени в конкретной почве или почвенной комбинации для конкретной технологии использования сельскохозяйственного угодья на основе прямых измерений. Кроме того, используя дифференцированный отбор образцов почв по глубине, на уровне динамической площадки по результатам одного начального срока измерений возможно делать предварительные заключения о способности той или иной технологии выполнять углерод-секвестрирующую функцию в почве.

Для выбора положения динамических площадок мониторинга содержания и запасов органического углерода ($C_{\text{орг}}$) в почвах опытной станции в условиях пашни на богаре и орошении был выполнен ретроспективный анализ землепользования [15] на основе методики, разработанной в лаборатории почвенной информатики ФИЦ Почвенный институт им. В.В. Докучаева [1, 29]. Использованы космические снимки Landsat и Sentinel с 1973 по 2023 гг. разных сезонов, наземная оценка фактического состояния угодий в 2020–2023 гг., информация о виде угодий в публикациях сотрудников ВНИИОЗа и консультации гидротехников опытной станции. В QGIS создан векторный слой состояния земельных угодий в разные периоды. Выявлено 9 вариантов смены угодий во времени: 1 – богара постоянно с 1970 г.; 2 – богара → орошение → богара; 3 – орошение → богара; 4 – богара →

орошение; 5 – орошение → богара → орошение; 6 – орошение → богара → залежь; 7 – богара → залежь; 8 – залежь постоянно с 1970 г.; 9 – не используемые в последние годы земли.

Выбраны три вида угодий с длительностью однотипного использования более 30 лет для ведения мониторинга (рис. 1e): (1) пашня с традиционной системой обработки почвы, включающей вспашку с оборотом пласта на глубину от 22 до 35 см под разные культуры в севообороте в условиях сухого земледелия (богара) постоянно с 1970 г. и, с высокой вероятностью, с еще более раннего срока; (2) пашня также с традиционной системой обработки почвы в условиях орошения с 1973 г., включая полив дождевальной машиной “Фрегат” с 1988 г.; (3) многолетнюю залежь с типчаково-ковыльной растительной ассоциацией по меньшей мере с 1970 г. (энтомологи ВНИИОЗа ее считают целиной [14]). Все участки с 7 динамическими площадками имеют уклон не более 1°, почвообразующие породы в виде палево-бурых средних суглинков мощностью от 2.5 до 3.5 м и более, светло-каштановые почвы по классификации почв СССР [12]. Почвы различаются по строению профиля (см. раздел Результаты).

При определении положения динамической площадки в пространстве использовалась общая информация о почвах и почвенных комбинациях на опытной станции, основанная на 342 почвенных разрезах, выполненных в период 2019–2023 гг., рельеф, карта коэффициента C мультивременной линии почв (рис. 1c), созданная на основе больших спутниковых данных открытой поверхности почв [81, 82], и наземное опробование вскипания почвы от HCl с дневной поверхности. В полевых условиях перед закладкой динамической площадки оценивали относительную качественную однородность участка по вскипанию от HCl с поверхности в радиусе 25–30 м от центральной точки, т.е. на существенно большей площади (в 4 раза по площади и в 2 раза по радиусу), по сравнению с размером самой площадки (30×30 м). Это сделано с целью возможного потенциального смещения центра площадки за счет погрешности определения географических координат приемниками GPS-GLOAS, составляющей ± 15 м при измерениях в разные периоды во времени, даже в течение суток. Расположение динамических площадок представлено на рис. 1, их краткая общая характеристика – в табл. 1.

Методика отбора образцов для определения запасов углерода. Каждая динамическая площадка имеет размер 30×30 м и включает 9 индивидуальных точек опробования, расположенных крестом. Расстояние между соседними точками вдоль луча 7 м. В каждой из 9 точек выполнен дифференцированный отбор образцов почв по глубине тонкими слоями толщиной 5–10 см на содержание

Таблица 1. Общая характеристика динамических площадок (отбор 8–12 июля и 24 августа 2023 г.)

Номер	Угодье	Рельеф	Высота, м	Растительность	Почвенный покров и почвообразующие породы
Ор-Б-1	Пашня, богара	Ровный приводо-раздельный склон юго-восточной экспозиции, уклон до 1°	116	Стерня озимой пшеницы и сорная растительность	K-1977: светло-каштановые солонцеватые пахотные среднесуглинистые почвы на палево-бурых суглинках; PK-2004(22): агрокаштановые солонцеватые сегрегационные высоковскрывающие глубоко гипсодержащие среднесуглинистые на палево-бурых суглинках; WRB: Haplic Kastanozem (Aric, Loamic, Protosodic, Bathygypsic)
Ор-Б-2	Пашня, богара	Ровный приводо-раздельный склон юго-восточной экспозиции, уклон 1°	122	Стерня озимой пшеницы и сорная растительность	K-1977: светло-каштановые солонцеватые пахотные среднесуглинистые почвы на палево-бурых суглинках; PK-2004(22): агрокаштановые солонцеватые сегрегационные высоковскрывающие глубоко гипсодержащие среднесуглинистые на палево-бурых суглинках; WRB: Haplic Kastanozem (Aric, Loamic, Protosodic, Bathygypsic)
Ор-Б-3	Пашня, богара	Общий склон восточной экспозиции, слабовыпуклый широкий гребень между верховьями двух разветвленных систем ложбин	110	Стерня озимой пшеницы и сорная растительность	K-1977: светло-каштановые пахотные слабосмытые карбонатные среднесуглинистые почвы на палево-бурых суглинках; PK-2004(22): агроземы аккумулятивно-карбонатные сегрегационные агроабрадированные гипсодержащие профильно-вскрывающие среднесуглинистые на палево-бурых суглинках; WRB: Calcic Kastanozem (Aric, Loamic, Endogypsic)
Ор-Б-4	Пашня, богара	Общий склон восточной экспозиции, слабовыпуклый широкий гребень между верховьями двух разветвленных систем ложбин	92	Стерня озимой пшеницы и сорная растительность	K-1977: светло-каштановые пахотные слабосмытые карбонатные среднесуглинистые почвы на палево-бурых суглинках; PK-2004(22): агроземы аккумулятивно-карбонатные сегрегационные агроабрадированные глубоко гипсодержащие профильно-вскрывающие среднесуглинистые на палево-бурых суглинках; WRB: Haplic Kastanozem (Aric, Loamic, Bathygypsic)

Окончание табл. 1

Номер	Угодье	Рельеф	Высота, м	Растительность	Почвенный покров и почвообразующие породы
Ор-ФР-К1	Пашня, орошение, дождевальная машина “Фрегат”	Слабовыпуклая приводораздельная поверхность между ложбинами	108	Кукуруза на силос	K-1977: светло-каштановые солонцеватые пахотные орошаемые слабосмытые карбонатные среднесуглинистые почвы на палево-бурых суглинках; PK-2004(22): агроземы аккумулятивно-карбонатные солонцеватые сегрегационные агроабрадированные глубоко гипсодержащие профильно-вскипающие среднесуглинистые на палево-бурых суглинках; WRB: Haplic Kastanozem (Aric, Loamic, Protosodic, Bathygypsic)
Ор-ФР-К2	Пашня, орошение, дождевальная машина “Фрегат”	Пологий склон северо-западной экспозиции	109	Кукуруза на силос	K-1977: светло-каштановые солонцеватые пахотные орошаемые слабосмытые карбонатные среднесуглинистые почвы на палево-бурых суглинках; PK-2004(22): агроземы аккумулятивно-карбонатные солонцеватые сегрегационные агроабрадированные глубоко гипсодержащие профильно-вскипающие среднесуглинистые на палево-бурых суглинках; WRB: Haplic Kastanozem (Aric, Loamic, Protosodic, Bathygypsic)
Ор-М3-1	Залежь более 50 лет	Пологий склон восточной экспозиции в 100 от бровки балки Западной	102	Ковыль (<i>Stipa capillata</i>), типчак (<i>Festuca valesiaca</i>), редко полынь (<i>Artemisia sp.</i>), мятылик луковичный (<i>Poa bulbosa</i>), ромашник (<i>Tanacetum achilleifolium</i>)	K-1977: светло-каштановые солонцеватые среднесуглинистые почвы на палево-бурых суглинках; PK-2004(22): агрокаштановые постагрогенные солонцеватые срединно-вскипающие глубоко-гипсодержащие дернинные среднесуглинистые на палево-бурых суглинках; WRB: Haplic Kastanozem (Loamic, Protosodic, Bathygypsic)

органического углерода [37], морфологическое описание почвенного профиля и идентификация почв по трем классификациям почв: СССР (далее К-1977) [12], России (далее PK-2004(22)) [11, 24, 38, 39] и международной (далее WRB) [60]. Основная схема отбора образцов: 0–5, 5–10, 10–20, 20–30, 30–40 см. На площадках Ор-Б-1, Ор-Б-2 и Ор-Б-3 дополнительно дифференцирован слой 20–30 см

на две части 20–25 и 25–30 см по нижней границе пахотного горизонта, составляющей на площадках 25–26 см. На 50-летней залежи с типчаково-ковыльным растительным покровом, отчетливой нижней границей бывшего пахотного горизонта на глубине 22 см и появлению вскипания от HCl с 32 см схема изменена: 0–5, 5–10, 10–22, 22–32, 32–40 см. При сравнении динамических площадок

между собой данные, полученные по индивидуальным схемам отбора по глубине, преобразовали к единой основной схеме с фиксированными границами слоев 0–5, 5–10, 10–20, 20–30, 30–40 см, получая взвешенную по мощности слоя величину соответствующего показателя.

В центральной точке помимо отбора образцов на содержание органического углерода по тем же слоям определяли плотность почвы в 5-кратной повторности. Объем режущего полого цилиндра 212 см³ (высота 4 см, диаметр 8.22 см). Расстояние между цилиндрами 6–10 см вдоль подготовленной горизонтальной площадки на глубине, соответствующей верхней границе или центральной части анализируемого слоя. Всего на одной динамической площадке отбирали 45 или 54 индивидуальных образцов на содержание органического углерода (9 точек по 5(6) глубинам), 25 или 30 образцов на плотность и влажность почв (5 повторений на 5(6) глубинах).

Содержание общего углерода ($C_{общ}$, %) во всех образцах определяли методом сухого сжигания на анализаторе Метавак CS производства ООО НПО Эксан, Россия. Исследованные почвы содержат карбонаты, поэтому содержание органического углерода ($C_{опр}$, %) рассчитывали по разности:

$$C_{опр} = C_{общ} - C_{карб},$$

где $C_{карб}$ – содержание углерода карбонатов, полученное методом Козловского [28] с расчетом именно содержания углерода.

В июле и августе 2023 г. заложено 7 динамических площадок наземного мониторинга на разных сельскохозяйственных угодьях и почвах после уборки культур, предполагая равновесную плотность почв (табл. S1). На орошаемом поле уборку кукурузы на силос в хозяйстве производят во второй половине августа, на бояре уборку озимой пшеницы – во второй половине июля.

Запасы $C_{опр}$ в отдельных слоях рассчитывали по уравнению:

$$St.SOC = C h \rho ,$$

где St.SOC – запас углерода в отдельном слое, т/га; C – содержание органического углерода в слое почвы, %; h – мощность слоя, см; ρ – плотность слоя почвы, г/см³.

Для обобщенных слоев 0–10, 0–20, 0–30, 0–40 см величина запасов органического углерода почвы равна сумме запасов углерода составляющих отдельных слоев.

Для каждой динамической площадки получали характеристики общей статистики (1) плотности почвы в отдельном слое; (2) содержания $C_{опр}$ в отдельном слое; (3) запасов $C_{опр}$ в отдельном слое;

(4) запасов $C_{опр}$ в обобщенном слое увеличивающейся мощности; (5) разности содержания $C_{опр}$ между соседними слоями в каждой точке; (6) разности содержания $C_{опр}$ между поверхностным слоем 0–5 см и последовательно отдельными нижележащими слоями в отдельной точке. Общая статистика включала оценку соответствия статистического распределения нормальному закону по критерию Уилка–Шапиро, объем выборки, среднее арифметическое, среднеквадратическое отклонение, асимметрию, эксцесс; минимум, нижний quartиль, медиану, верхний quartиль, максимум. Сравнение средних значений показателей разных динамических площадок выполняли по критерию Стьюдента, дисперсий – по критерию Фишера. Расчеты выполнены в MS Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Почвы на динамических площадках относятся к подтипу светло-каштановых почв по К-1977 и имеют опесчаниенный среднесуглинистый гранулометрический состав с содержанием ила (<1 мкм) 25–30%, крупной пыли (10–50 мкм) 16–25%, мелкого песка (50–250 мкм) 16–35% и среднего песка (250–500 мкм) 6–15%. В соответствии со строением почвенного профиля динамические площадки характеризуют два типа почв по РК-2004: агрокаштановые почвы с профилем Р–ВМК–ВСАнс–ВСса и агроземы аккумулятивно-карбонатные с профилем Рса–ВСАнс–ВСса. В типе агроземов исчез ксерометаморфический горизонт ВМК в результате мелиоративных вспашек до глубины 30 см, эрозионных потерь материала поверхности слоя и постепенной припашки верхней части аккумулятивно-карбонатного горизонта ВСАнс с белоглазкой.

На 50-летней залежи с типчаково-ковыльной растительностью, которую по растительному покрову иногда называют целиной, почвенный профиль имеет формулу (в круглых скобках глубина нижней границы горизонта в центральной точке на динамической площадке) AJrz,pa(5)–Ppa,rz(22)–BMKsn(32(34))–Bca,sn(40)–BCAnс,sn(50)–BCAnс(85)–BCsa(102)–Cca,cs(295+). В почве ясно прослеживается ровная нижняя граница бывшего пахотного горизонта на глубине 22 см по изменению цвета между горизонтами Ppa,rz и BMKsn, формы почвенных агрегатов, обнаружению редких антропогенных артефактов (рис. S2). Эта граница во всех 9 точках площадки Ор-МЗ-1 оказалась равна 22 см без вариаций. Длительное произрастание дерновинных злаков привело к формированию дернины (признак rz) в пределах всего бывшего пахотного горизонта. Возле дневной поверхности дернина наиболее густая. Это обеспечило сильное преобразование верхней части пахотного горизонта в светлогумусовый горизонт AJrz,pa с редкими

остаточными признаками бывшей пахоты (признак pa — постагрогенный). Мощность гор. AJrz,pa варьирует в интервале от 5 до 7 см с медианой 5 и средним арифметическим 5.7 см.

Сохранившаяся часть ксерометаморфического горизонта BMKsn со слабыми признаками солонцеватости в виде редких гумусово-глинистых кутан на боковых гранях призматических агрегатов (признак sn) имеет мощность от 10 до 12 см, в среднем 11 см с нижней границей на глубине 32–34 см, значение которой приблизительно соответствует нижнему квартилю кумулятивного распределения этой величины в срединно-вспыхивающих агрокаштановых почвах опытной станции [63]. Причем вариация глубины нижней границы BMKsn в пределах почвенного разреза в центральной точке совпада с общей вариацией этого показателя на всей динамической площадке. Эта граница соответствует глубине вскипания в почвах площадки Ор-М3-1. Признаки солонцеватости прослеживаются до глубины около 50 см, охватывая верхнюю часть карбонатных горизонтов. Мощность аккумулятивно-карбонатного горизонта BCAnc с белоглазкой составляет 45–50 см, что соответствует центральной части кумулятивного распределения этого показателя в почвах опытной станции “Орошаемая” в пределах между персентилями 40 и 60% [63].

Две динамические площадки на богаре (Ор-Б-1 и Ор-Б-2) характеризуют агрокаштановые солонцеватые срединно-вспыхивающие среднесуглинистые почвы на палево-бурых опесчаненных суглинках с профилем в центральных точках Р1(5)–Р2(10)–Р3(26)– $\text{BMKca,sn}(35)$ – $\text{Bca}(38)(40)$ – $\text{BCAnc}(66)$ – $\text{BCca}(106)$ – $\text{BCca,cs}(136)$ – $\text{Cca,cs}(216)$ – $\text{2C2ca,q}(246)$ – $\text{3C3ca,cs}(266+)$ на Ор-Б-1-1 и Р1(5)–Р2(10)–Р3(15)–Р4(22)–Р5pb(26)– $\text{BMKsn}(32)(35)$ – $\text{BMKca,sn}(39)(40)$ – $\text{BCAnc}(72)$ – $\text{BCca}(122)$ – $\text{Cca,cs}(257+)$ на Ор-Б-2-1 (рис. S3). Средняя мощность пахотного горизонта составляла 25–26 см, что определило необходимость раздельного анализа слоев 20–25 и 25–30 см, представленных разными горизонтами Р и ВМК. Пространственная вариация на площадках глубины границ верхних горизонтов сравнительно небольшая, абсолютные значения среднеквадратического отклонения составляют 1–3 см, коэффициент вариации 2–10% (табл. 2). Для горизонтов малой мощности (до 10 см) коэффициент вариации возрастает до 25%.

В агрокаштановых почвах многолетней залежи и на богаре поверхностные горизонты выщелочены от карбонатов кальция. Сплошное вскипание от HCl начинается с глубины от 25 до 38 см, ему соответствует содержание CaCO_3 от 0.5 до 1%, возрастаю через 10–15 см до содержания 2–4% и достигая 8–15% в верхней части горизонта BCAnc (рис. 2а–2с).

Агроземы аккумулятивно-карбонатные сегрегационные профильно-вспыхивающие на богарной (Ор-Б-3 и Ор-Б-4) и орошающей (Ор-ФР-К1 и Ор-ФР-К2) пашне имеют очень близкие морфометрические характеристики верхних горизонтов (рис. S4, S5). С этих позиций их можно считать аналогами. Для этих почв характерно сильное сплошное вскипание с дневной поверхности и по всему почвенному профилю. В пахотных горизонтах в среднем содержится 2–4% CaCO_3 . В аккумулятивно-карбонатном горизонте BCAnc , который начинается непосредственно от нижней границы пахотного горизонта, содержание CaCO_3 сильно варьирует как в пределах отдельных площадок, так и на разных площадках (рис. 2d–2g). Среднеквадратическое отклонение содержания CaCO_3 на отдельных площадках изменяется от 2.8 до 6.5%, коэффициент вариации – от 13 до 56%, среднее содержание 11.5–12.5 на трех площадках и 21% на одной (Ор-Б-3). Это означает, что в почвах площадки Ор-Б-3 есть горизонт calcic (содержание $\text{CaCO}_3 > 15\%$) по WRB, а в названии почв используется главный квалификатор Calcic. Остальные почвы имеют главный квалификатор Haplic.

В почвах на всех площадках есть горизонты со скоплениями прожилок мелкокристаллического гипса, верхняя граница которых начинается от 90 до 155 см (рис. 3). На трех площадках (Ор-Б-1, Ор-Б-4 и Ор-ФР-К1) почвы глубокосолончаковые слабозасоленные сульфатно-натриевого или хлоридно-сульфатного натриевого химизма с гипсом. Почвы на залежи (Ор-М3-1) глубокослабозасоленные сульфатно-натриевые с гипсом. Остальные три площадки (Ор-Б-2, Ор-Б-3 и Ор-ФР-К2) не имеют засоления по формальным критериям, хотя активность ионов натрия в этих почвах составляет 5–15 ммол/л при влажности 40 мас. %, что соответствует содержанию водорастворимого натрия 0.2–0.6 смоль(экв)/кг. Орошаемые почвы имеют еще одну особенность солевого состава. В пахотных горизонтах активности ионов Cl^- и Na^+ соответствуют содержанию этих ионов в поливной воде, вызывая вторичное осолонцевание и накопление обменного натрия до 5–8% от емкости катионного обмена.

Почвы на площадках имеют разный вертикальный профиль распределения плотности (табл. 3) при общей тенденции более низкой плотности ближе к поверхности. В орошаемых почвах пахотные горизонты уплотнены до 1.3–1.37 г/см³, в богарных почвах плотность ближе к оптимуму 1.1–1.15 г/см³ в слое до глубины 10 см, но заметно возрастает до 1.3–1.4 г/см³ в слое 10–25 см (нижняя часть пахотного горизонта). Карбонатные горизонты средней части профиля во всех почвах отличаются высокой плотностью 1.35–1.48 г/см³.

Пространственное варьирование содержания C_{opr} в пахотных почвах динамических площадок увеличивается по мере углубления слоя. Абсолютные

Таблица 2. Статистическая характеристика глубины и мощности верхних горизонтов на динамических площадках ($n = 9$)

Площадка	Показатель почвы*	Значение статистического показателя*					
		min	med	max	M	SD	V, %
Ор-М3-1	AJrz, см	5	5	7	5.7	0.9	15.8
	BMK down, см	32	33	34	33.2	0.8	2.4
	M BMK, см	10	11	12	11.2	0.8	7.1
	Гвск, см	32	33	34	33.2	0.8	2.4
Ор-Б-1	Гвск, см	26	35	38	33.7	3.3	9.8
	P down, см	25	25	30	25.7	1.7	6.6
	BMK down, см	32	35	38	34.7	1.7	4.9
	M BMK, см	5	9	13	9.0	2.2	24.4
Ор-Б-2	Гвск, см	28	34	35	33.2	2.0	6.0
	P down, см	25	26	26	25.6	0.5	2.0
	BMK down, см	33	34	40	34.7	2.1	6.1
	M BMK, см	7	8	14	9.0	2.1	23.3
Ор-Б-3	P down, см	28	32	35	32.3	2.3	7.1
	M pb, см	5	15	25	15.9	6.1	38.4
	D pb, %	17	46	71	48.8	17.7	36.3
Ор-Б-4	P down, см	30	32	37	33.1	3.1	9.4
	M pb, см	5	10	15	10.1	2.9	28.7
	D pb, %	14	33	41	30.7	8.3	27.0
Ор-ФР-К1	P down, см	27	33	37	32.0	3.8	11.9
	M pb, см	5	11	15	10.0	3.8	38.0
	D pb, %	19	33	41	30.3	8.4	27.7
Ор-ФР-К2	P down, см	28	30	33	30.1	1.3	4.3
	M pb, см	5	8	13	7.8	2.5	32.1
	D pb, %	17	24	43	25.9	8.4	32.4

* Показатель почвы: AJrz – мощность светлогумусового горизонта с дерниной, см; BMK down – глубина нижней границы ксерометаморфического горизонта BMK, см; M BMK – мощность горизонта BMK, см; Гвск – глубина сплошного вскипания от HCl, см; P down – глубина нижней границы агрогумусового (пахотного) горизонта P, см; M pb – мощность нижней части агрогумусового горизонта Ppb, содержащего приплаханные фрагменты нижележащего горизонта, см; D pb – доля мощности подгоризонта Ppb от общей мощности горизонта P, %. Статистические показатели: min – минимум, med – медиана, max – максимум, M – среднее арифметическое, SD – среднеквадратическое отклонение, V – коэффициент вариации, %.

значения среднеквадратического отклонения в слое 0–5 см составляет 0.04–0.12%, а в слоях 20–30 и 30–40 см – 0.09–0.25%. В том же направлении увеличивается и коэффициент вариации от 4–14 до 20–40% (табл. S6). На многолетней залежи (Ор-М3-1) наибольшее варьирование характерно в поверхностном горизонте AJrz,pa (SD = 0.31%) и умеренное варьирование в нижележащих слоях

от 5 до 40 см (SD от 0.07 до 0.16%), коэффициент вариации во всех слоях не превышает 15%.

Вертикальное распределение $C_{опт}$ по профилю зависит от вида угодья (рис. 4, табл. S6). На многолетней залежи (Ор-М3-1) сформировался хорошо выраженный аккумулятивный тип распределения с максимумом возле поверхности. Содержание $C_{опт}$ в слое 0–5 см в среднем равно 2.2%, уже в слое

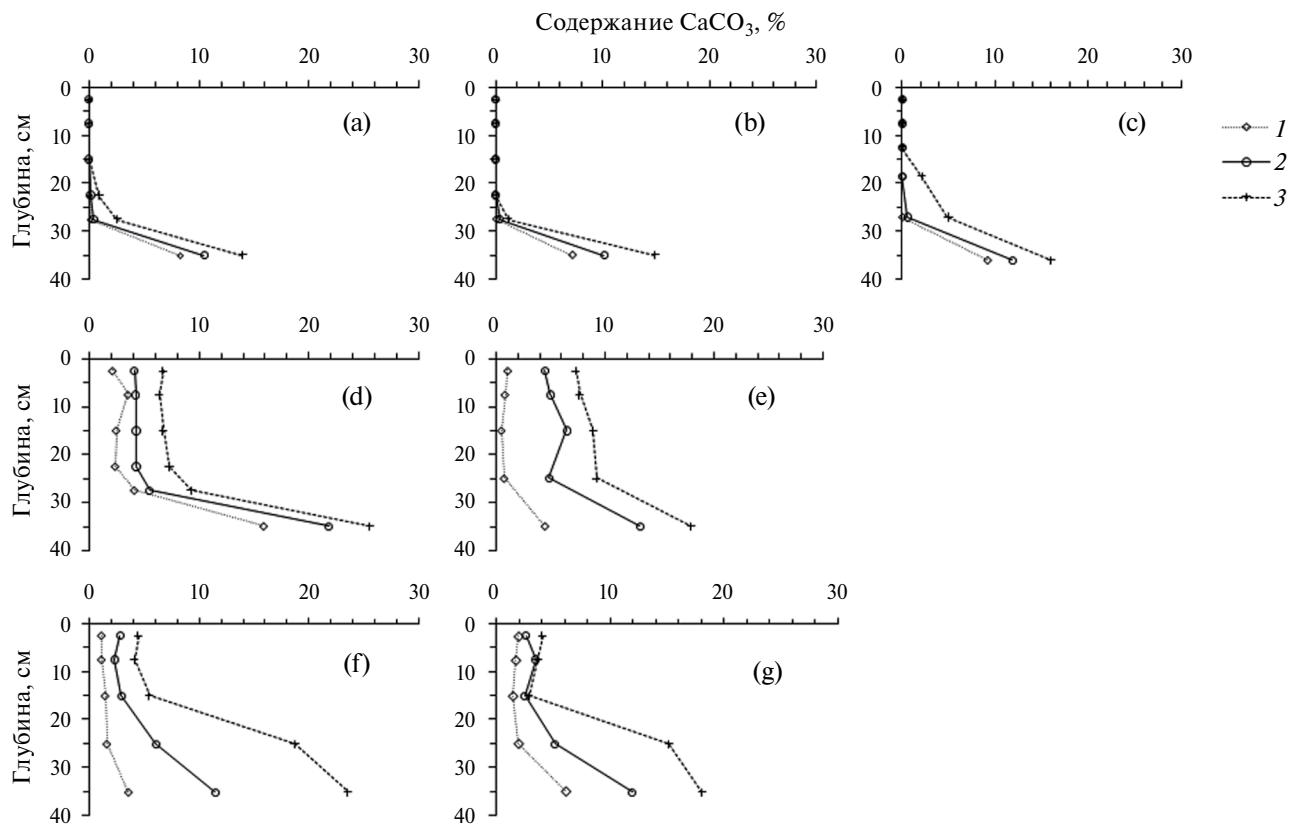


Рис. 2. Вертикальное распределение содержания карбонатов в верхних горизонтах почв динамических площадок: (а) – Ор-Б-1; (б) – Ор-Б-2; (с) – Ор-МЗ-1; (д) – Ор-Б-3; (е) – Ор-Б-4; (ф) – Ор-ФР-К1; (г) – Ор-ФР-К2. 1 – минимум, 2 – медиана, 3 – максимум; $n = 9$.

5–10 см оно резко уменьшается до 1.4%, оставаясь выше 1% на глубине 30–40 см. На всех 6 динамических площадках на пашне в пределах агрогумусового (пахотного) горизонта отмечено статистически равномерное вертикальное распределение содержания C_{opr} . В горизонтах BMK и BCAnC содержание C_{opr} значительно меньше, чем в Р.

Пространственное варьирование запасов C_{opr} в исследуемых почвах зависит от глубины отдельного слоя и общей мощности слоя (рис. 5а–5д, табл. S7). В пределах пахотного горизонта абсолютные и относительные значения варьирования изменяются в узких пределах: среднеквадратическое отклонение в пятисантиметровых слоях от 0.23 до 1.1 т/га в среднем 0.55 т/га, в десятисантиметровых слоях от 0.9 до 1.9 т/га. В горизонтах глубже нижней границы пахотного слоя варьирование увеличивается приблизительно в 2 раза (SD 1.4–3.5 т/га).

Для обобщенных слоев получена регрессионная линейная модель увеличения среднеквадратического отклонения (Y , т/га) от запаса C_{opr} (X , т/га): $Y = 0.0689X$, число степеней свободы 32, $R^2 = 0.8$, при одинаковом разбросе коэффициента вариации

от 3 до 15% во всем диапазоне изменения запасов C_{opr} (рис. 5б).

Запасы C_{opr} в тонких слоях почвы (рис. 6а–6е; табл. S7). В пахотных почвах в поверхностных пятисантиметровых слоях запасы C_{opr} изменяются в диапазоне 5.3–9.1 т/га, в среднем 6.2 т/га. В ниже расположенных десятисантиметровых слоях в пределах пахотного горизонта в среднем 13.3 т/га при разбросе от 11.3 до 16.9 т/га, и в горизонтах BMK или BCAnC в слое 30–40 см в среднем запас C_{opr} уменьшается до 10.5 т/га при разбросе от 6.6 до 12.9 т/га. Заметная вариация запасов C_{opr} определяется преимущественно разной плотностью разных частей пахотного горизонта на разных площадках на фоне близких значений содержания C_{opr} и статистически равномерного его вертикального распределения в пределах пахотного горизонта.

Запасы C_{opr} в обобщенных слоях почвы (рис. 6f–6i; табл. S8) закономерно увеличиваются по мере увеличения мощности расчетного слоя. В референтном слое 0–30 см запасы C_{opr} в пахотных почвах изменяются от 36.6 до 45.4 т/га на разных динамических площадках, в среднем 39.3 т/га. В слое

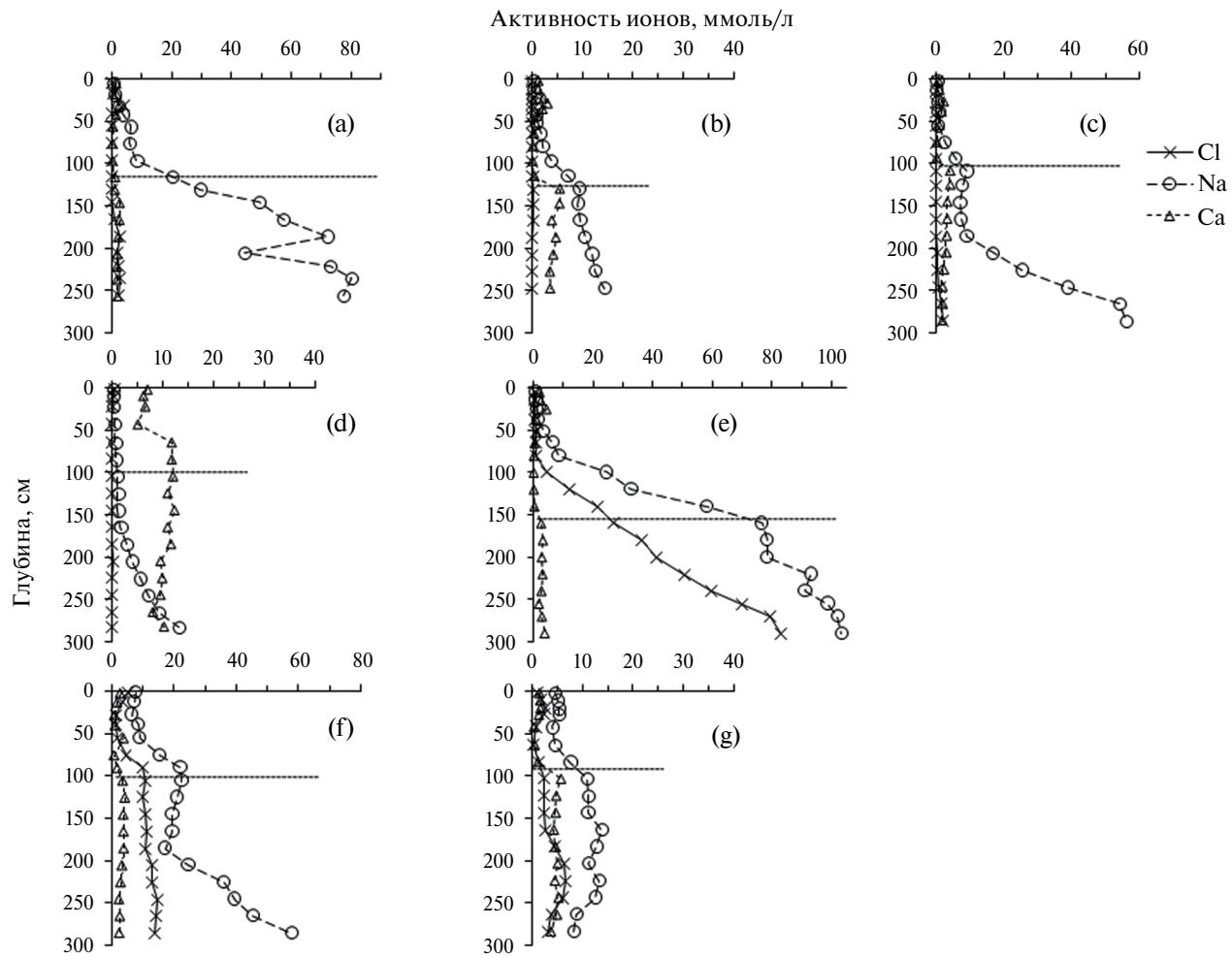


Рис. 3. Вертикальное распределение активности ионов Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} в почвах динамических площадок, измеренной в пастах с влажностью 40 мас. %. Динамические площадки: (а) – Ор-Б-1; (б) – Ор-Б-2; (с) – Ор-М3-1; (д) – Ор-Б-3; (е) – Ор-Б-4; (ф) – Ор-ФР-К1; (г) – Ор-ФР-К2. Горизонтальная пунктирная линия – верхняя граница морфологического проявления скоплений мелкокристаллического гипса.

0–40 см, включающем весь гумусовый профиль, содержится от 42.2 до 56.7 т/га, в среднем 49.9 т/га.

Сравнение содержания и запасов $C_{\text{опр}}$ в почвах исследованных динамических площадок. Измерения, представленные в статье, при ведении мониторинга характеризуют базовый начальный уровень содержания и запасов $C_{\text{опр}}$. Оценка возможного его изменения во времени предполагается не раньше, чем через 5–10 лет. Связи с этим важно экспериментально оценить минимальную значимую разницу рассматриваемых показателей в два разных срока измерений на основе сравнения почв в пространстве на разных динамических площадках. На тестовом полигоне опытной станции “Орошаемая” возможны следующие варианты сравнения, имеющие смысловую нагрузку: (1) две площадки Ор-Б-1 и Ор-Б-2, представленные агрокаштановыми солонцеватыми почвами на богарной пашне;

(2) две площадки Ор-Б-3 и Ор-Б-4 агроземов аккумулятивно-карбонатных профильно-вскрывающих на богарной пашне; (3) две площадки Ор-ФР-К1 и Ор-ФР-К2 агроземов аккумулятивно-карбонатных профильно-вскрывающих на орошаемой пашне; (4) почвы на пашне в разных комбинациях: богара – орошения и/или агрокаштановые – агроземы; (5) почву залежи с почвами пашни.

По содержанию $C_{\text{опр}}$ и его вертикальному распределению пары пахотных почв, указанные в первых трех вариантах, не отличаются друг от друга по парно. Если сравнивать разные почвы на богаре или богару и орошение, имеются как незначимые, так и значимые различия между отдельными площадками (рис. 4). При этом минимальная значимая разность для разных пар площадок изменяется в интервале от 0.07 до 0.19% $C_{\text{опр}}$. Наибольшие значения характерны при сравнении с орошаемыми

Таблица 3. Плотность и влажность почв динамических площадок (M – среднее арифметическое; SD – среднеквадратическое отклонение; min – минимум, max – максимум)

Площадка	Глубина, см	Плотность почвы, г/см ³				Влажность, мас. %	
		M	SD	min	max	M	SD
Op-Б-1	0–4	1.14	0.04	1.09	1.18	5.1	0.3
	5–9	1.10	0.04	1.03	1.14	9.8	0.3
	12–16	1.21	0.03	1.17	1.25	11.7	0.2
	20–24	1.25	0.04	1.20	1.3	12.2	0.3
	26–30	1.41	0.05	1.35	1.48	12.6	0.4
	33–37	1.43	0.07	1.36	1.53	12.2	0.6
Op-Б-2	0–5	1.12	0.07	1.01	1.19	4.2	0.2
	5–9	1.39	0.10	1.25	1.47	8.8	0.4
	13–17	1.45	0.08	1.33	1.53	11.1	0.5
	20–24	1.37	0.05	1.32	1.45	11.3	0.2
	26–30	1.36	0.05	1.29	1.41	12.8	0.2
	34–38	1.49	0.04	1.43	1.53	11.2	0.4
Op-Б-3	0–4	1.09	0.06	1.01	1.17	20.2	0.7
	5–9	1.13	0.04	1.06	1.16	11.8	1.1
	13–17	1.31	0.05	1.26	1.39	10.9	0.2
	20–24	1.30	0.05	1.24	1.38	11.4	0.2
	25–29	1.34	0.05	1.24	1.38	11.2	0.3
	33–37	1.30	0.04	1.25	1.36	12.7	0.2
Op-Б-4	0–5	1.19	0.04	1.15	1.24	4.1	0.5
	5–10	1.22	0.03	1.17	1.26	6.3	0.5
	13–17	1.32	0.10	1.17	1.43	9.3	0.2
	23–27	1.32	0.05	1.25	1.38	10.1	0.3
	34–38	1.38	0.02	1.35	1.41	8.5	0.4
	0–5	1.07	0.07	0.99	1.18	12.5	2.4
Op-М3-1	5–10	1.29	0.04	1.22	1.33	7.2	0.6
	10–15	1.27	0.09	1.16	1.37	7.6	0.2
	15–20	1.38	0.08	1.24	1.45	7.6	0.1
	23–27	1.38	0.07	1.31	1.46	8.7	1.3
	34–38	1.49	0.03	1.47	1.53	7.9	0.3
	0–5	1.32	0.09	1.25	1.46	3.7	0.3
Op-ФР-К1	5–10	1.33	0.11	1.28	1.52	8.8	0.6
	13–17	1.39	0.09	1.29	1.54	10	0.3
	23–27	1.35	0.07	1.27	1.43	10.4	0.1
	30–34	1.47	0.06	1.40	1.55	10.5	0.3
	37–41	1.52	0.03	1.50	1.55	9.6	0.4
	0–5	1.21	0.04	1.15	1.26	4	0.2
Op-ФР-К2	5–10	1.37	0.05	1.30	1.44	8.7	0.7
	13–17	1.48	0.12	1.36	1.61	12.7	0.3
	23–27	1.47	0.03	1.44	1.52	12.5	0.5
	34–38	1.53	0.03	1.47	1.57	10.3	1.6

почвами. Иными словами, на опытной станции пахотные агрокаштановые почвы и агроzemы аккумулятивно-карбонатные (светло-каштановые почвы по К-1977) очень близки по содержанию C_{opt} в связи с общим низким уровнем этого показателя в исследованных почвах и заметным пространственным варьированием на площадках небольших размеров. Агрокаштановая постагрогенная почва 50-летней залежи значительно отличается от почв пашни более высоким содержанием C_{opt} по всему профилю, особенно в поверхностном светлогумусовом постагрогенном горизонте с дерниной AJz,pa.

Минимальная значимая разница запасов C_{opt} увеличивается, во-первых, по мере углубления тонкого (толщина 5 или 10 см) слоя с 0.5–1 т/га на глубине менее 10 см до 2–4 т/га на глубине 30–40 см, во-вторых, при увеличении мощности обобщенного слоя (рис. 5e, 5f). Второе положение может быть представлено линейной регрессией без свободного члена $Y = 0.1X$, число степеней свободы 104, $R^2 = 0.665$, где Y – минимальная значимая разность, т/га, X – запас C_{opt} в обобщенном слое от поверхности до некоторой глубины, т/га, R^2 – коэффициент детерминации.

На залежи запасы C_{opt} почти во всех слоях значимо выше по сравнению с почвами пашни. Исключением является только слой 10–20 см на залежи (Ор-МЗ-1) и на богарной пашне (Ор-Б-2), в котором отсутствие значимых различий запасов C_{opt} обусловлено компенсирующим совокупным эффектом более высокого содержания C_{opt} и более низкой плотности на залежи по сравнению с пашней.

На пашне наблюдаются случайные (незакономерные) варианты значимых и незначимых различий запасов C_{opt} во всех тонких и обобщенных слоях между сравниваемыми динамическими площадками, которые определяются плотностью сравниваемых слоев.

ОБСУЖДЕНИЕ

Светло-каштановые почвы, согласно классификации почв СССР [12], содержат 1.5–2.2% гумуса (0.87–1.28% C_{opt}) в пахотном горизонте средне-, тяжелосуглинистых и глинистых разновидностей пахотных почв и около 2.5% гумуса (1.45% C_{opt}) в слое 15 см в целинных и старозалежных вариантах. Сравнивая эти значения с полученными оценками на исследованных динамических площадках на территории опытной станции “Орошаемая” (0.85–1.15% в пахотных горизонтах и 1.65% C_{opt} в почве залежи), допустимо сделать вывод о представительности выбранных объектов для мониторинга. Аналогичные результаты представлены разными авторами для светло-каштановых почв междуречья Волги и Дона [2, 16, 41, 42, 78].

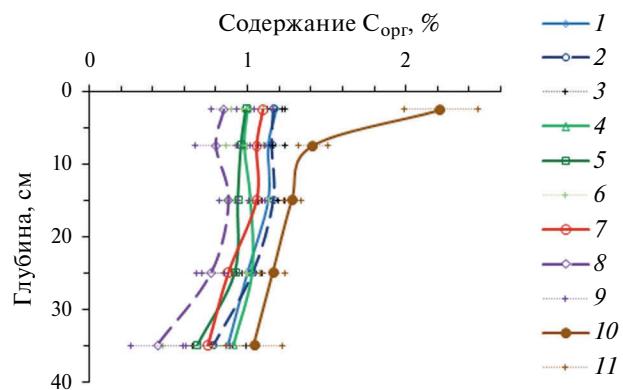


Рис. 4. Вертикальное распределение содержания C_{opt} в почвах динамических площадок (1, 2, 4, 5, 7, 8, 10) и доверительные интервалы в отдельных слоях (3, 6, 9, 11). Динамические площадки: 1 – Ор-Б-1; 2 – Ор-Б-2; 4 – Ор-Б-3; 5 – Ор-Б-4; 7 – Ор-ФР-К1; 8 – Ор-ФР-К2; 10 – Ор-МЗ-1.

В работе [20] в слое 0–50 см для двух экспериментальных семипольных зерно-кормовых севооборотов при орошении на той же опытной станции приводятся запасы гумуса 111–125 т/га (64–72 т/га C_{opt}), что сопоставимо с запасами C_{opt} на многолетней залежи (площадка Ор-МЗ-1 – 71 т/га в слое 0–40 см) и в 1.3–1.5 раза выше, чем на исследованных динамических площадках на богарной (Ор-Б-1, Ор-Б-2, Ор-Б-3, Ор-Б-4) и орошаемой (Ор-ФР-К1, Ор-ФР-К2) пашне (42–56 т/га в слое 0–40 см). Минеральные карбонатные горизонты в слое 40–50 см содержат не более 3–4 т/га C_{opt} . Отмеченное различие может быть связано с обычной ситуацией, когда на экспериментальных опытных делянках получают более высокие значения показателей по сравнению с производственными полями.

Для залежей на светло-каштановых суглинистых почвах Астраханской области [18] приводятся существенно более низкие запасы C_{opt} в слое 0–50 см, составляющие 32–38 т/га (в источнике 3.2–3.8 кг/м²) независимо от длительности залежного режима от 1 года до 50 лет и 44 т/га в почве на целине. Очевидно, различия с динамическими площадками на опытной станции “Орошаемая” обусловлено более засушливыми условиями функционирования объектов в Астраханской области, которые расположены ближе к южной границе распространения светло-каштановых почв на переходе к бурым полупустынным почвам. В последних почвах, включая целину, запасы C_{opt} еще ниже – 23–27 т/га [18].

На основе использования дифференцированного отбора образцов почв тонкими слоями в пределах верхней части почвенного профиля [37] для всех почв динамических площадок получено вертикальное равномерное распределение содержания C_{opt} в пределах пахотного горизонта до глубины

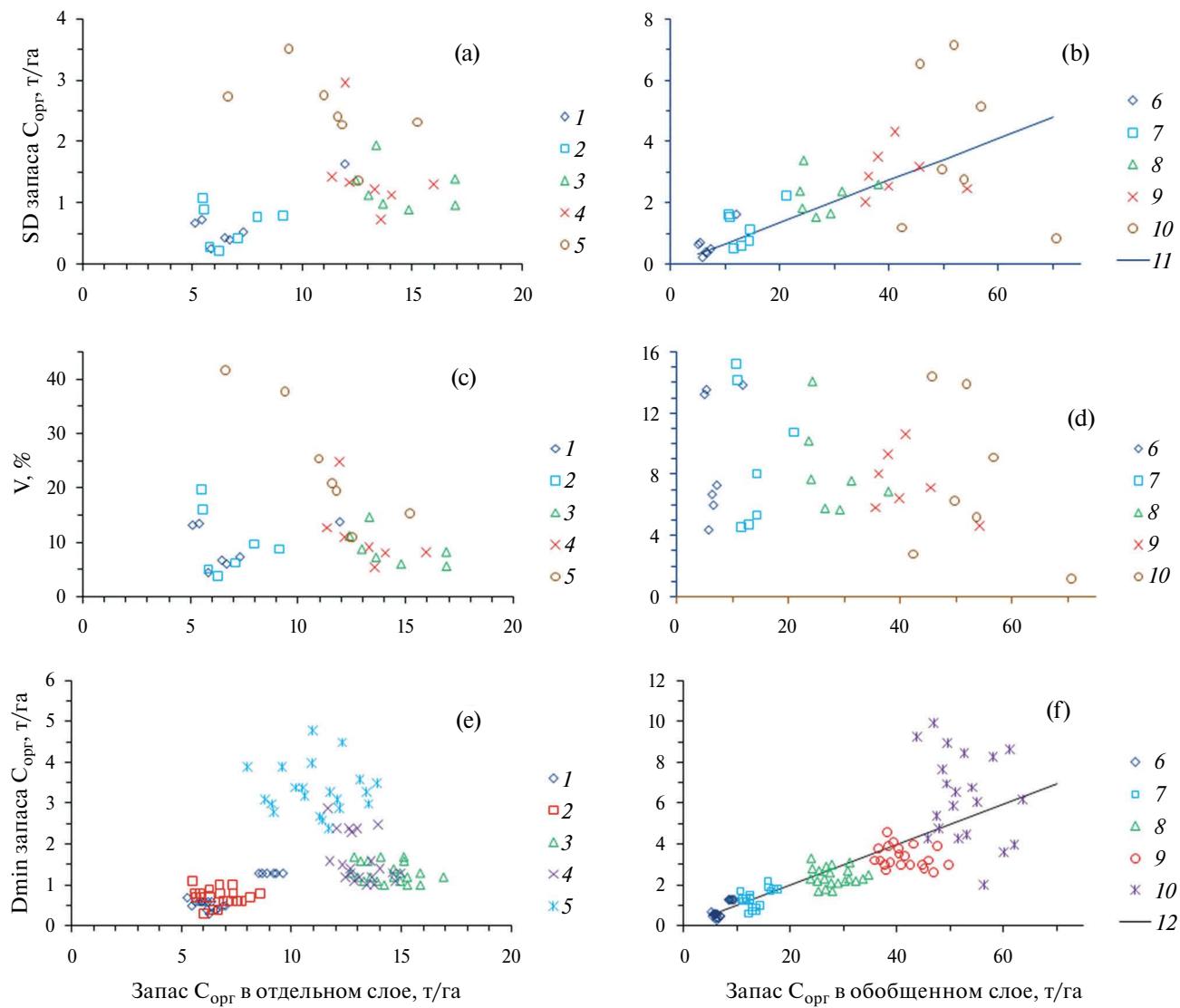
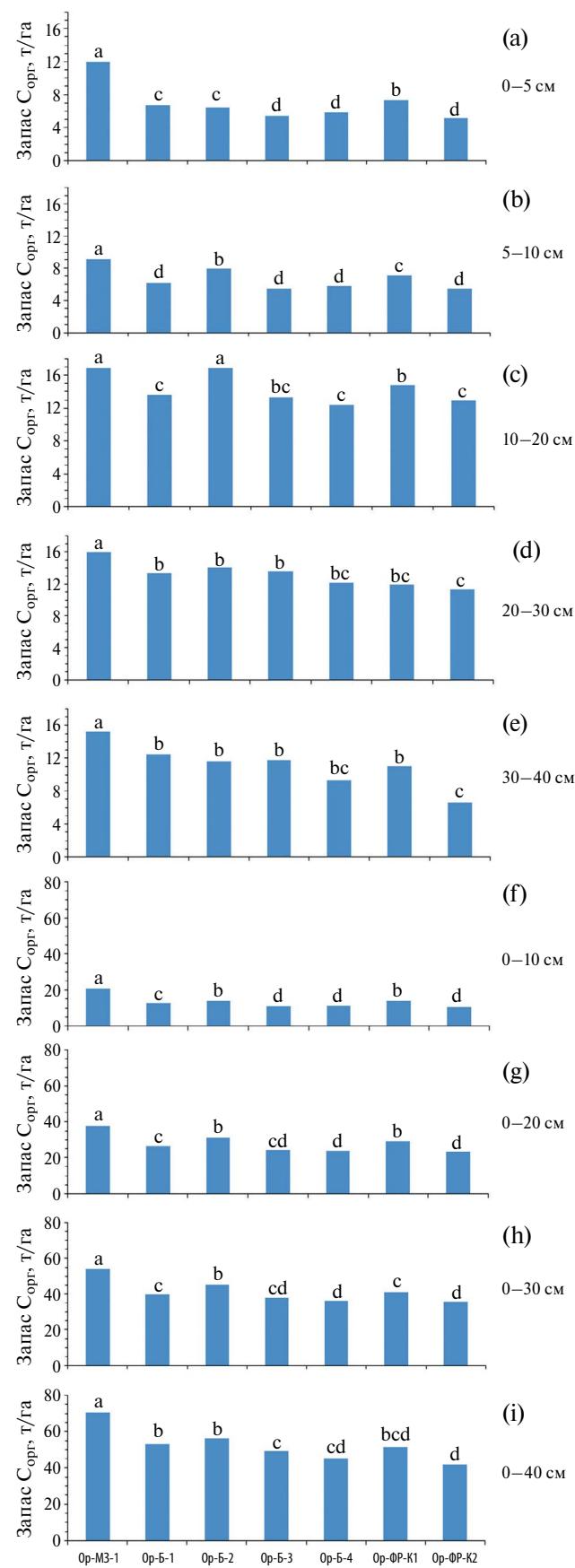


Рис. 5. Пространственное варьирование ((а), (б), (с), (д)) и минимальная значимая разность ((е), (ф)) запасов C_{опр} в отдельных ((а), (с), (е)) и обобщенных ((б), (д), (ф)) слоях почв в зависимости от средних значений показателя. (а), (б) – абсолютные значения среднеквадратического отклонения (SD), (с), (д) – коэффициент вариации (V). Отдельные слои 0–5 см (1), 5–10 см (2), 10–20 см (3), 20–30 см (4), 30–40 см (5). Обобщенные слои 0–5 см (6), 0–10 см (7), 0–20 см (8), 0–30 см (9), 0–40 см (10). 11 – тренд: $Y = 0.0689X$, число степеней свободы 32, $R^2 = 0.8$, коэффициент регрессии значим; 12 – тренд: $Y = 0.1X$, число степеней свободы 104, $R^2 = 0.665$, коэффициент регрессии значим.

25–30 см. Это дает основание допустить, что используемая на опытной станции система севооборотов и на богаре, и на орошении обеспечивает в современных условиях нулевой баланс содержания C_{опр} на пашне на уровне в среднем для пар динамических площадок 1.12 ± 0.10% ($M \pm SD$) в агрокаштановых почвах на богаре, 0.98 ± 0.11% в агроземах аккумулятивно-карбонатных на богаре и 0.93 ± 0.17% в агроземах на орошаемой пашне. Полученные числовые значения свидетельствуют о значимо более высокой пространственной вариации содержания C_{опр} в пахотном горизонте на орошаемой пашне по сравнению с богарной пашней.

Средние значения содержания C_{опр} в агроземах аккумулятивно-карбонатных на богаре и орошении незначимо отличаются друг от друга, но значимо меньше, чем в агрокаштановых почвах на богарной пашне.

Интерпретация такого соотношения может быть в трех вариантах. В первом варианте интерпретации указанные почвы можно выстроить в эволюционный ряд преобразования светло-каштановых почв при их вовлечении в богарную пашню и далее орошаемую пашню. Если в начале этого ряда поставить агрокаштановую почву 50-летней залежи, которую иногда считают целинной по состоянию



растительной ассоциации, то начальным вертикальным распределением содержания $C_{\text{опт}}$ можно считать аккумулятивное с максимумом возле поверхности со средневзвешенным значением $C_{\text{опт}}$ в слое 0–22 см $1.52 \pm 0.10\%$ ($M \pm SD$). В этом ряду после распашки образуется пахотный горизонт, который включает в себя бывший маломощный светлогумусовый горизонт целинной почвы и верхнюю часть ксерометаморфического горизонта BMK с сохранением большей части BMK – профиль Р–BMK–BCA. Вертикальное распределение содержания $C_{\text{опт}}$ становится равномерным в пределах пахотного горизонта. Далее в результате эрозионных потерь части пахотного горизонта происходит последовательная припашка оставшейся части горизонта BMK и уменьшение содержания $C_{\text{опт}}$ в пахотном горизонте как за счет частичной минерализации органических веществ, так и за счет разбавления горизонта материалом с более низким содержанием $C_{\text{опт}}$ снизу. При этом до тех пор, пока сохраняется в профиле хотя бы небольшая часть BMK, почва диагностируется как агрокаштановая. После полного вовлечения BMK в пахотный горизонт формула профиля упрощается Р–BCA, почва становится агроzemом аккумулятивно-карбонатным. При дальнейших эрозионных потерях пахотного горизонта сверху его мощность воспроизводится ежегодной вспашкой на относительно постоянную глубину, последовательно подрезая более глубокие карбонатные горизонты профиля и перемешивая их материал с оставшейся частью пахотного слоя. В результате такой эволюции логично ожидать постепенное уменьшение содержания $C_{\text{опт}}$ в пахотном горизонте на фоне увеличения его пространственной вариации в ряду агрокаштановая почва → агроzem на богаре = агроzem на орошении.

Оценим такой вариант на основе условного расчета. Если смешать два слоя AJ 0–15 см с $C_{\text{опт}} = 1.52\%$ и BMK на глубине 15–25 см с $C_{\text{опт}} = 0.7\%$, получим горизонт Р 0–25 см с $C_{\text{опт}} = 1.19\%$, величину, соответствующую верхнему пределу содержания $C_{\text{опт}}$ в исследованных пахотных горизонтах агрокаштановых почв на богаре. При формировании агроzemов из агрокаштановых почв происходит смешение материала горизонта Р без карбонатов с материалом горизонтов Bca и BCAnс, содержащих 6–10% CaCO_3 и 0.5–0.6% $C_{\text{опт}}$. Учитывая содержание карбонатов в горизонте Рса в агроzemах,

Рис. 6. Запасы $C_{\text{опт}}$ в отдельных ((a), (b), (c), (d), (e)) и обобщенных ((f), (g), (h), (i)) слоях почв динамических площадок. Слои: (a) – 0–5 см; (b) – 5–10 см; (c) – 10–20 см; (d) – 20–30 см; (e) – 30–40 см; (f) – 0–10 см; (g) – 0–20 см; (h) – 0–30 см; (i) – 0–40 см. В пределах слоя разные буквы над столбиками означают значимые различия при доверительной вероятности 0.95.

равное ≈ 2%, следует допустить долю примешанных нижних горизонтов около одной четверти от общей мощности пахотного горизонта. Тогда расчетное содержание $C_{\text{опр}}$ в пахотном горизонте агрозема будет 0.96–0.99%, что соответствует экспериментальным значениям на площадках Ор-Б-3, Ор-Б-4, Ор-ФР-К1, Ор-ФР-К2. Иными словами, интерпретация в виде эволюционного ряда выглядит правдоподобно.

Во втором варианте интерпретации данных следует учесть, что исследованные динамические площадки расположены далеко друг от друга – более 200–500 м между ближайшими и до 4 км между крайними. Это обстоятельство предполагает допустить исходный разный уровень содержания $C_{\text{опр}}$ в почвах разных динамических площадок, который нам не известен и мог оказаться влияние на результаты, полученные в ходе исследования этих разных объектов. Иными словами, в настоящий момент допускаем сходство пар динамических площадок по строению почвенного профиля, однотипным почвообразующим породам, сходным элементам рельефа и однотипному в пределах каждого поля агрономического и мелиоративного воздействия. Различие воздействий (пашня на богаре и пашня на орошении), с одной стороны, и разное строение почвенного профиля (Р–ВМК–ВСА и Рса–ВСА), с другой, рассматриваются как влияющие факторы. Статистически влияние строения профиля на богарной пашне оказалось значимым. Вместе с тем большой разброс значений на орошении дает неоднозначные результаты при сравнении отдельных площадок между агроземами богары и орошения и между агрокаштановыми почвами богары и агроземами орошения. В результате рассуждения по эволюционному ряду становятся менее надежными.

Третим вариантом интерпретации данных может быть условный хронологический ряд в виде пары агрокаштановых почв на пашне и на 50-летней залежи. Если допустить, что современная многолетняя залежь в период ее использования в прошлом в пашне имела равномерное вертикальное распределение содержания $C_{\text{опр}}$ в пахотном слое, приблизительно равным современным пахотным почвам на богаре (среднее из двух площадок $1.12 \pm 0.10\%$ и запас 42.8 ± 3.5 т/га в слое 0–30 см), то линейный тренд увеличения содержания $C_{\text{опр}}$ получится 0.022, 0.006, 0.003, 0.0008%/год в слоях 0–5, 5–10, 10–20 и 20–30 см соответственно, а в целом для запасов $C_{\text{опр}}$ в слое 0–30 см – 0.23 т/(га год). Учитывая минимальную значимую разность средних содержания $C_{\text{опр}}$ в два срока в слоях до глубины 10 см при 9-кратной пространственной повторности на площадке 30×30 м, равную 0.1–0.15%, и аналогичную величину для запаса $C_{\text{опр}}$ в слое 0–30 см, равную 4.0 ± 0.5 т/га, при переводе агрокаштановых почв из пашни в залежь значимое накопление содержания $C_{\text{опр}}$ следует ожидать

в слое 0–5 см через 5–7 лет, на глубине 5–10 см через 17–20 лет, а значимое увеличение запаса $C_{\text{опр}}$ в слое 0–30 см – через 17–20 лет. При всей условности приведенных оценок, полученный результат означает, что при ведении мониторинга $C_{\text{опр}}$ в светло-каштановых почвах в пашне значимые изменения следует ожидать, прежде всего, в поверхностном слое до глубины 5 или 10 см на интервалах времени не менее 10 лет. Что удивительно, данные оценки сопоставимы с имеющимися в литературе [25, 33, 49, 50, 53].

К сожалению, это закономерно при обсуждении данных хронологических или эволюционных рядов почв, поскольку обеспечить действительно равные прочие условия нереально, возможно лишь некоторое приближение. Использование таких рядов – вынужденная мера. Она связана с известными трудностями организации мониторинга свойств почв на основе прямых измерений показателей при отборе образцов почв – необходимо учитывать пространственную разнотипность и неоднородность почвенного покрова, пространственную вариабельность элементарных почвенных ареалов, сезонную динамику изучаемого свойства и воспроизводимость используемых методов измерения. Настоящая работа направлена на определение базового уровня содержания и запасов $C_{\text{опр}}$ в почвах опытной станции на фиксированных динамических площадках небольших размеров для проведения аналогичных измерений в другие сроки, сводя к минимуму неравенство прочих условий.

До этого обсуждали только содержание $C_{\text{опр}}$ в почвах. Рассматривая запасы $C_{\text{опр}}$, интерпретация становится сложнее и менее надежной, поскольку появляется дополнительный важный фактор, влияющий на эти величины, – это плотность почвы, которая сильно зависит от антропогенных воздействий. Выше отмечалось, что почвы на площадках имеют разный вертикальный профиль распределения плотности при общей тенденции более низкой плотности ближе к поверхности. Причем при парном сравнении одинаковых по глубине слоев на разных площадках получены незакономерные значимые и незначимые разницы. Это привело к тому, что только почва 50-летней залежи значимо отличается самыми высокими запасами $C_{\text{опр}}$ в слоях 0–10, 0–20, 0–30 и 0–40 см от всех остальных пахотных почв благодаря самым высоким значениям содержания $C_{\text{опр}}$ по всему профилю (рис. 6f–6i). Среди площадок на пашне часто выделяются Ор-Б-1 и Ор-Б-2 агрокаштановых почв на богаре с тенденцией более высоких значений по сравнению в агроземами при отсутствии значимых отличий с некоторыми из них. Более определенные выводы по запасам $C_{\text{опр}}$ в изученных почвах сделать трудно. Имеющиеся в литературе предложения производить расчеты запасов $C_{\text{опр}}$ на единую

эквивалентную массу почвы [51, 68, 90] пока разнородны. В настоящей статье этот подход не использован.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для тестового полигона на территории опытной станции “Орошаемая” в Волгоградской области (Россия) на юге Приволжской возвышенности представлены числовые значения оценок базового уровня содержания, запасов органического углерода ($C_{\text{опт}}$), плотности почв, показателей их пространственного варьирования и дифференцированного вертикального распределения в пределах слоя 0–40 см, охватывающего весь гумусовый слой. Указанные показатели характеризуют пашню в севообороте на богаре и на орошении и 50-летнюю залежь на семи динамических площадках с агрокаштановыми почвами и агроземами аккумулятивно-карбонатными среднесуглинистыми на палево-бурых опесчаненных суглинках (Haplic Kastanozems (Loamic, Aric)). Каждая динамическая площадка 30 × 30 м представлена девятью индивидуальными точками с дифференцированным отбором образцов по глубине тонкими слоями по 5 или 10 см.

Для выбора объектов мониторинга использовали карту коэффициентов мультивременной линии почв, ретроспективный анализ данных дистанционного зондирования за 40 лет и почвенное обследование.

Коэффициент вариации содержания и запасов $C_{\text{опт}}$ в пространстве увеличивается с 5–10 до 30–40% по мере увеличения глубины слоя. Минимальная значимая разница запасов $C_{\text{опт}}$ для сравниваемых динамических площадок увеличивается, во-первых, по мере углубления тонкого (толщина 5 или 10 см) слоя с 0.5–1 т/га на глубине менее 10 см до 2–4 т/га на глубине 30–40 см, во-вторых, при увеличении мощности обобщенного слоя. Для слоя 0–30 см минимальная значимая разность запасов $C_{\text{опт}}$ в среднем составляет 3.4 т/га при вариации от 2.7 до 4.6 т/га. На сравнение запасов $C_{\text{опт}}$ разных динамических площадок существенное влияние оказывает вертикальное распределение плотности почвы, зависящее от антропогенных воздействий.

На пашне обосновано равномерное вертикальное распределение содержания $C_{\text{опт}}$ в пределах пахотного слоя. На залежи восстанавливается аккумулятивный тип вертикального распределения с максимумом $C_{\text{опт}}$ возле поверхности в светлогумусовом постагротенном горизонте с дерниной.

Исследованные динамические площадки prawdopodobno укладываются в условный хронологический ряд богара–залежь и условный эволюционный ряд светло-каштановых почв с разным строением почвенного профиля AYrz–AB–BMK–Bsa–BCAnc →

P–BMK–Bsa–BCAnc → Psa–BCAnc при переходе от целины к пашне с последующей эрозией части поверхностного слоя на фоне продолжающейся вспашки с оборотом пласта.

Полученные оценки содержания и запасов $C_{\text{опт}}$ (от 36 до 45 т/га в слое 0–30 см, от 42 до 64 т/га в слое 0–40 см на пашне и 54 и 71 т/га на залежи соответственно) сопоставимы с имеющимися материалами по светло-каштановым почвам между речью Волги и Дона. Выбранные объекты являются представительными для ведения мониторинга.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят Испытательный лабораторный центр ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева” за проведение аналитических работ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения “Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах” (рег. № 123030300031-6).

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Онлайн-версия содержит дополнительные материалы, доступные по адресу
<https://doi.org/10.31857/S0032180X24120028>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Брызжев А.В., Рухович Д.И., Королева П.В., Калинина Н.В., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В. Организация ретроспективного мониторинга почвенного покрова и земель Азовского района Ростовской области // Почвоведение. 2013. № 11. С. 1294–1315.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X13110026>
- Вадюнина А.Ф. Агрофизическая и мелиоративная характеристика каштановых почв юго-востока

- европейской части СССР. М.: Изд-во МГУ, 1970. 325 с.
3. Владыченский А.С., Телеснина В.М., Румянцева К.А., Чалая Т.А. Органическое вещество и биологическая активность постагрогенных почв южной тайги (на примере Костромской области) // Почвоведение. 2013. № 5. С. 570. <https://doi.org/10.1134/S1064229313050141>
 4. ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества.
 5. Гудкова З.П., Мелихова Н.П. Повышение продуктивности севооборотов за счет промежуточных культур // Севообороты в условиях орошения. Сб. тр. ВНИИОЗ. Волгоград, 1983. С. 48–51.
 6. Дегтярева Е.Т., Жулидова А.Н. Почвы Волгоградской области. Волгоград: Нижне-Волжское книжное изд-во, 1970. 319 с.
 7. Дубровина И.А., Мошкина Е.В., Сидорова В.А., Тюнен А.В., Карпенко А.Ю., Геникова Н.В., Медведева М.В., Мамай А.В., Толстогузов О.В., Кулакова Л.М. Влияние типа землепользования на свойства почв и структуру экосистемных запасов углерода в среднетаежной подзоне Карелии // Почвоведение. 2021. № 11. С. 1392–1406. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21110058>
 8. Жеребцов Г. А., Коваленко В. А., Молодых С. И., Рубцова О. А. Закономерности климатических изменений в XX в. и основные физические процессы, ответственные за эти изменения // Известия Иркутского гос. ун-та. Сер. Науки о Земле. 211. Т. 4. № 1. С. 87–108.
 9. Зинченко Е.В., Горохова И.Н., Круглякова Н.Г., Хитров Н.Б. Современное состояние орошаемых почв юга Приволжской возвышенности // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2020. Вып. 104. С. 68–109. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2020-104-68-109>
 10. Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации, масштаб 1 : 2 500 000 / Под ред. Добровольского Г.В., Урусевской И.С. М.: Изд-во МГУ, 2013.
 11. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
 12. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
 13. Когут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н. Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода // Агрехимия. 2021. № 5. С. 3–13.
 14. Комаров Е.В. К распространению, биотопическому распределению, фенологии и динамике численности жужелицы венгерской, *Carabus hungaricus* Fabricius, 1792 (Coleoptera, Carabidae), в Волгоградской области за последние 40 лет // Энтомологическое обозрение. 2022. Т. 101. С. 300–311. <https://doi.org/10.31857/S0367144522020071>
 15. Круглякова Н.Г., Хитров Н.Б. Ретроспективный анализ использования сельскохозяйственных угодий опытной станции “Орошаемая” в течение полувека, Волгоградская область // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2024. Вып. 121. С. 241–280. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2024-241-280>
 16. Кружилин И.П., Болотин А.Г., Бекмаметов А.А. Плодородие светло-каштановых почв при водосберегающем орошении // Плодородие. 2009. № 6. С. 34–35.
 17. Кружилин И.П., Мамин В.Ф., Дронова Т.Н., Степанов А.М., Болотин А.Г., Кузнецова Н.В., Толоконников В.В. и др. Система орошаемого земледелия ОПХ “Орошающее” (модель адаптивно-ландшафтной системы земледелия на период 2001–2005 гг.). Волгоград, 2000. 110 с.
 18. Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М.: ГЕОС, 2010. 415 с.
 19. МГЭИК 2006, Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов МГЭИК, 2006 г. Подготовлено Программой МГЭИК по национальным кадастрам парниковых газов. ИГЕС, Япония.
 20. Мелихов В.В., Зибаров А.А., Мелихова Н.П., Вронская Л.В. Факторы управления плодородием почвы в системе орошаемых севооборотов Нижнего Поволжья // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2018. № 4. С. 96–103. <https://doi.org/10.32786/2071-9485-2018-04-12>
 21. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2003. 240 с.
 22. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и экологико-экономических последствий деградации земель. Адаптивные системы и технологии рационального природопользования (сельское и лесное хозяйство)”. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2018. 357 с. ISBN 978-5-89118-762-2
 23. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
 24. Результаты исследований изменений климата для стратегий устойчивого развития Российской Федерации, 2005. <https://www.meteorf.gov.ru/upload/iblock/e5b/3380-Verstka-19-may-2006-A4-compr.pdf>
 25. Романенков В.А., Мешалкина Ю.Л., Горбачева А.Ю., Кренке А.Н., Петров И.К., Голозубов О.М., Рувович Д.И. Карты потенциала секвестрации

- почвенного углерода в пахотных почвах России // Почвоведение. 2024. № 5. В печати
26. Романовская А.А. Органический углерод в почвах залежных земель России // Почвоведение. 2006. № 1. С. 52–61.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X2360018X>
 27. Российский национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции по-глоторителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом. М.: ИГКЭ, 2023
 28. Руководство по лабораторным методам исследования ионно-солевого состава нейтральных и щелочных минеральных почв / Под ред. Хитрова Н.Б., Понизовского А.А. М.: Почв. Ин-т им. В.В. Докучаева, 1990. 236 с.
 29. Рухович Д.И., Симакова М.С., Кулянича А.Л., Брызжев А.В., Королева П.В., Калинина Н.В., Вильчевская Е.В., Долинина Е.А., Рухович С.В. Ретроспективный анализ изменчивости землепользования на слитых почвах замкнутых западин Приазовья // Почвоведение. 2015. № 10. С. 1168–1194.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X15100093>
 30. Рыжова И.М., Ерохова А.А., Подвезенная М.А. Динамика и структура запасов углерода в постагротических экосистемах южной тайги // Почвоведение. 2014. № 12. С. 1426–1435.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X14090111>
 31. Рыжова И.М., Телеснина В.М., Ситникова А.А. Динамика свойств почв и структуры запасов углерода в постагротических экосистемах в процессе естественного лесовосстановления // Почвоведение. 2020. № 2. С. 230–243.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X20020100>
 32. Семенов В.М., Когут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
 33. Сорокина Н.П., Когут Б.М. Динамика содержания гумуса в пахотных черноземах и подходы к ее изучению // Почвоведение. 1997. № 2. С. 178–184.
 34. Телеснина В.М., Курганова И.Н., Лопес Де Гереню В.О. Овсепян Л.А., Личко В.И., Ермолов А.М., Мирин Д.М. Динамика свойств почв и состава растительности в ходе постагротического развития в разных биоклиматических зонах // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1514–1534.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X17120115>
 35. Темнышова В. А., Денисова Е. В. Ландшафтное районирование Волгоградской области // Научно-методический электронный журнал “Концепт”. 2014. Т. 20. С. 2066–2070. <http://e-koncept.ru/2014/54677.htm>.
 36. Технологические карты по возделыванию полевых культур на орошаемых землях. Волгоград: Волгоградская правда, 1975. 82 с.
 37. Хитров Н.Б. Дифференцированный отбор образцов почв по глубине в пределах поверхностного слоя 0–30 см для мониторинга содержания и запасов органического углерода // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2024. В печати.
 38. Хитров Н.Б., Герасимова М.И. Диагностические горизонты в классификации почв России: версия 2021 // Почвоведение. 2021. № 8. С. 899–910.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X21080098>
 39. Хитров Н.Б., Герасимова М.И. Предлагаемые изменения в классификации почв России: диагностические признаки и почвообразующие породы // Почвоведение. 2022. № 1. С. 3–14.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22010087>
 40. Хитров Н.Б., Никитин Д.А., Иванова Е.А., Семенов М.В. Пространственно-временная изменчивость содержания и запасов органического вещества почвы: аналитический обзор // Почвоведение. 2023. № 12. С. 1493–1521.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X23600841>
 41. Чамурлиев О.Г., Мелихова Н.П., Зинченко Е.В. Минимизация способов основной обработки почвы под сою на орошаемых землях Нижнего Поволжья. Волгоград: Волгоградский ГАУ, 2013. 101 с.
 42. Чамурлиев О.Г., Морозова А.С. Основные свойства орошаемых светло-каштановых почв и направленность их изменение под влиянием управляющих плодородием факторов // Орошаемое земледелие в агроландшафтах степей: Сб. науч. тр. Волгоград, ВНИИОЗ, 1994. С. 23–44.
 43. Angers D.A. Eriksen-Hamel N.S. Full-Inversion Tillage and Organic Carbon Distribution in Soil Profiles: A Meta-Analysis // Soil Sci. Soc. Am. J. 2007. V. 72. P. 1370–1374.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0342>
 44. Bai Z., Caspary T., Gonzalez M.R., Batjes N.H., Mäder P., Büemann, E. K., de Goede R., Brussaard L., Xu M., Ferreira C.S.S., Reintam E., Fan H., Mihelič R., Glavan M., Tóth, Z. Effects of agricultural management practices on soil quality: A review of long-term experiments for Europe and China // Agriculture, Ecosystems and Environment, 2018. V. 265. P. 1–7.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.05.028>
 45. Carolan R., Fornara D.A. Soil carbon cycling and storage along a chronosequence of re-seeded grasslands: Do soil carbon stocks increase with grassland age? // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2016. V. 218. P. 126–132.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2015.11.021>
 46. Cerri C.E P., Easter M., Paustian K., Killian K., Coleman K., Bernoux M., Falloon P., Powelson D.S., Batjes N., Milne E., Cerri C.C. Simulating SOC changes in 11 land use change chronosequences from the Brazilian Amazon with RothC and Century models // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2007. V. 122. P. 46–57.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.01.007>
 47. de Moraes Sá.J.C., Cerri C.C., Lal R., Dick W.A., de Cassia Piccolo M., Feigl B.E. Soil organic carbon and fertility interactions

- affected by a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol // *Soil Till. Res.* 2009. V. 104. P. 56–64. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.11.007>
48. *de Paul Obade V., Lal R.* Using meta-analyses to assess pedo-variability under different land uses and soil management in central Ohio, USA // *Geoderma*. 2014. V. 232–234. P. 56–68. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.030>
49. *Deng L., Wang K., Zhu G., Liu Y., Chen L., Shangguan Z.* Changes of soil carbon in five land use stages following 10 years of vegetation succession on the Loess Plateau, China // *Catena*. 2018. V. 171. P. 185–192. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.07.014>
50. *Dondini M., Martin M., De Camillis C., Uwizeye A., Soussana J.-F., Robinson T., Steinfeld H.* Global assessment of soil carbon in grasslands – From current stock estimates to sequestration potential. FAO Animal Production and Health Paper No. 187. Rome, FAO. 2023. <https://doi.org/10.4060/cc3981en>
51. *Ellert B., Bettany J.* Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes // *Canadian Journal of Soil Science*. 1995. V. 75. P. 529–538. <https://doi.org/10.4141/cjss95-075>
52. FAO. 2020. A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb0509en>
53. *Guillaume T., Bragazza L., Levasseur C., Libohova Z., Sinaj S.* Long-term soil organic carbon dynamics in temperate cropland-grassland systems // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2021. V. 305. P. 107184. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107184>
54. *Guo L.B., Gifford R.M.* Soil carbon stocks and land use change: a metaanalysis // *Global Change Biology*. 2002. V. 8. P. 345–360. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>
55. *Haddaway N.R., Hedlund K., Jackson L.E., Kätterer T., Lugato E., Thomsen I.K., Jørgensen H.B., Isberg P.E.* How does tillage intensity affect soil organic carbon? A systematic review // *Environmental Evidence*. 2017. V. 6. P. 1–48. <http://dx.doi.org/10.1186/s13750-017-0108-9>
56. *He N., Wu L., Wang Y., Han X.* Changes in carbon and nitrogen in soil particle-size fractions along a grassland restoration chronosequence in northern China // *Geoderma*. 2009. V. 150. P. 302–308. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.02.004>
57. <https://www.oroshaemoe34.ru/>
58. *Huang M., Zhou X., Cao F., Xia B., Zou Y.* No-tillage effect on rice yield in China: A meta-analysis // *Field Crops Research*. 2015. V. 183. P. 126–137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2015.07.022>
59. IPCC 2019, 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Published: IPCC, Switzerland.
60. IUSS Working Group WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Vienna: International Union of Soil Sciences (IUSS), 234 p.
61. *Jordon M.W., Smith P.* Modelling soil carbon stocks following reduced tillage intensity: A framework to estimate decomposition rate constant modifiers for RothC-26.3, demonstrated in north-west Europe // *Soil Till. Res.* 2022. V. 222. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105428>
62. *Jolivet C., Almeida-Falcon J.-L., Berché P., Boulonne L., Fontaine M., Gouny L., Lehmann S., Maître B., Ratié C., Schellenberger E., Soler-Dominguez N.* French Soil Quality Monitoring Network Manual. RMQS2: second metropolitan campaign, 2016–2027, Version 3. INRAE, Orléans, 2022. <https://doi.org/10.17180/KC64-NY88>
63. *Khitrov N.B., Gorokhova I.N., Kravchenko E.I.* Statistics on the Variation in Depth and Thickness of Soil Cover Horizons at the Oroshaemaya Experimental Station // *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2022. V. 77. P. 83–93. <https://doi.org/10.3103/S0147687422020028>
64. *Körschens M.* Long-term field experiments as the basis for practice-oriented humus research – a review // *Modern Concepts Developments in Agronomy*. 2021. V. 9. P. 922–924. <https://doi.org/10.31031/MCDA.2021.09.000714>
65. *Körschens M., Breitschuh G., Munzert M.* Soil Organic Matter Importance, Assessment, Methodological Problems // *Modern Concepts Developments in Agronomy*. 2023. V. 13. P. 1263–1266. <https://doi.org/10.31031/MCDA.2023.13.000808>
66. *Lacoste M., Minasny B., McBratney A., Michot D., Viraud V., Walter C.* High resolution 3D mapping of soil organic carbon in a heterogeneous agricultural landscape // *Geoderma*. 2014. V. 213. P. 296–311. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.002>
67. *Lemenih M., Karlstun E., Olsson M.* Soil organic matter dynamics after deforestation along a farm field chronosequence in southern highlands of Ethiopia // *Agriculture, Ecosystems Environment*. 2005. V. 109. P. 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.02.015>
68. *Meurer K.H.E., Haddaway N.R., Bolinder M.A., Kätterer T.* Tillage intensity affects total SOC stocks in boreotemperate regions only in the topsoil—A systematic review using an ESM approach // *Earth-Science Reviews*. 2018. V. 177. P. 613–622. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.12.015>
69. *Meurer K.H.E., Hendriks C.M.J., Faber J.H., Kuijkman P.J., van Egmond F., Garland G., Putku E., Barancikova G., Makovníková J., Chenu C., Herrmann A. M., Bispo A.* How does national SOC monitoring on agricultural soils align with the EU strategies? An example using five case studies // *Eur. J. Soil Sci.* 2024. V. 75. P. e13477. <https://doi.org/10.1111/ejss.13477>

70. *Minasny B., McBratney A.B., Malone B.P., Wheeler I.* Digital Mapping of Soil Carbon // *Adv. Agronomy*. 2013. V. 118. P. 1–47. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405942-9.00001-3>
71. *Morvan X., Saby N.P.A., Arrouays D., Le Bas C., Jones R.J.A., Verheijen F.G.A., Bellamy P.H., Stephens M., Kibblewhite M.G.* Soil monitoring in Europe: A review of existing systems and requirements for harmonization // *Sci. Total Environ.* 2008. V. 391. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.10.046>
72. *Mousavi S.R., Sarmadian F., Omid M., Bogaert P.* Three-dimensional mapping of soil organic carbon using soil and environmental covariates in an arid and semi-arid region of Iran // *Measurement*. 2022. V. 201. P. 111706. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111706>
73. *Murphy B., Rawson A., Ravenscroft L., Rankin M., Millard R.* Paired site sampling for soil carbon estimation. National Carbon Accounting System Technical Report No. 34. Canberra, ACT: Australian Greenhouse Office, 2003. 360 p. <http://www.fullcam.com/FullCAMServer/Help/reps/TR34%20Paired%20Site%20Sampling%20for%20Soil%20Carbon%20Estimation%20-%20New%20South%20Wales.pdf>
74. *Oliver G.R., Beets P.N., Garrett L.G., Pearce S.H., Kimberly M.O., Ford-Robertson J.B., Robertson K.A.* Variation in soil carbon in pine plantations and implications for monitoring soil carbon stocks in relation to land-use change and forest site management in New Zealand // *Forest Ecology and Management*. 2004. V. 203. P. 283–295. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.07.045>
75. *Padarian J., Stockmann U., Minasny B., McBratney A.B.* Monitoring changes in global soil organic carbon stocks from space // *Remote Sensing of Environment*. 2022. V. 281. P. 113260. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113260>
76. *Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A.* Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification // *Hydrology and Earth System Sciences*. 2007. V. 11. P. 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007> www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/1633/2007/
77. *Powlson D.S., Smith P., Coleman K., Smith J. U., Glendining M. J., Körtschens M., Franko U.* (1998). A European network of long-term sites for studies on soil organic matter // *Soil Till. Res.* 1998. V. 47. P. 263–274. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(98\)00115-9](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(98)00115-9)
78. *Prikhodko V.E., Manakhov D.V.* Soil processes at different structural levels of organization and diagnosis of their changes under irrigation // *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2010. V. 65. P. 52–60. <http://dx.doi.org/10.3103/S014768741002002X>
79. *Romanenko I.A., Romanenkov V.A., Smith P., Smith J.U., Sirotenko O.D., Lisovoi N.V., Shevtsova L.K., Rukhovich D.I., Koroleva P.V.* Constructing regional scenarios for sustainable agriculture in European Russia and Ukraine for 2000 to 2070 // *Regional Environmental Change*. 2007. V. 7. P. 63–77. <https://doi.org/10.1007/s10113-007-0032-6>
80. *Romanenkov V.A., Smith J.U., Smith P., Sirotenko O.D., Rukhovich D.I., Romanenko I.A.* Soil organic carbon dynamics of croplands in European Russia: estimates from the “model of humus balance” // *Regional Environmental Change*. 2007. V. 7. P. 93–104. <https://doi.org/10.1007/s10113-007-0031-7>
81. *Rukhovich D.I., Koroleva P.V., Rukhovich A.D., Komissarov M.A.* Informativeness of the Long-Term Average Spectral Characteristics of the Bare Soil Surface for the Detection of Soil Cover Degradation with the Neural Network Filtering of Remote Sensing Data // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. P. 124. <https://doi.org/10.3390/rs15010124>
82. *Rukhovich D.I., Koroleva P.V., Rukhovich A.D., Komissarov M.A.* Updating of the Archival Large-Scale Soil Map Based on the Multitemporal Spectral Characteristics of the Bare Soil Surface Landsat Scenes // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. P. 4491. <https://doi.org/10.3390/rs15184491>
83. *Rukhovich D.I., Koroleva P.V., Vilchevskaya E.V., Romanenkov V.A., Kolesnikova L.G.* Constructing a spatially-resolved database for modelling soil organic carbon stocks of croplands in European Russia // *Regional Environmental Change*. 2007. V. 7. P. 51–61. <https://doi.org/10.1007/s10113-007-0029-1>
84. *Saby N.P.A., Bellamy P.H., Morvan X., Arrouays D., Jones R.J.A., Verheijen F.G.A., Kibblewhite M.G., Verdoort A., Berényi Uveges J., Freudenschuss A., Simota C.* Will European soil-monitoring networks be able to detect changes in topsoil organic carbon content? // *Global Change Biology*. 2008. V. 14. P. 2432–2442. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01658.x>
85. *Schrumpf M., Schulze E.D., Kaiser K., Schumacher J.* How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories? // *Biogeosciences*. 2011. V. 8. P. 1193–1212. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1193-2011>
86. *Smith, P.* How long before a change in soil organic carbon can be detected? // *Global Change Biology*. 2004. V. 10. P. 1878–1883. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00854.x>
87. *Smith P., Soussana J.-F., Angers D., Schipper L., Chenu C., Rasse D.P., Batjes N. H., van Egmond F. et al.* How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal // *Global Change Biology*. 2019. V. 26. P. 219–241. <https://doi.org/10.1111/gcb.14815>
88. *Stolbovoy V., Montanarella L., Filippi N., Jones A., Gallego J., Grassi G.* Soil sampling protocol to certify the changes of organic carbon stock in mineral soil of the European Union. Version 2. EUR 21576 EN/2. 56 p.

- Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2007. ISBN: 978-92-79-05379-5
89. *Virto I., Barré P., Burlot A., Chenu C.* Carbon input differences as main factor explaining the variability in soil organic C storage in no-tilled compared to inversion tilled agrosystems // *Biogeochemistry*. 2012. V. 108. P. 17–26. <http://dx.doi.org/10.1007/s10533-011-9600-4>
90. *Wendt J., Hauser S.* An equivalent soil mass procedure for monitoring soil organic carbon in multiple soil layers // *Eur. J. Soil Sci.* 2013. V. 64. P. 12008. <https://doi.org/10.1111/ejss.12002>
91. *West T.O., Post W.M.* Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2002. V. 66. P. 1930–1946.

Methodological Approaches and Baseline of Ground-Based Monitoring of Soil Organic Carbon Content and Storage in Arable Light Chestnut Soils (Kastanozem), Volgograd Region

**N. B. Khitrov^{1,*}, I. N. Gorokhova¹, V. V. Ivanova¹, E. I. Kravchenko¹,
N. G. Kruglyakova^{1,2}, L. V. Rogovneva¹, and D. I. Rukhovich¹**

¹*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

²*All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture – branch of the Federal Scientific Center for Hydraulic Engineering and Land Reclamation named after A.N. Kostyakov, Volgograd, 400002 Russia*

**e-mail: khitrovn@gmail.com*

Numerical values of baseline evaluations of soil organic carbon (SOC) content, storages, soil bulk density, characteristics of their spatial variability and differential vertical distribution within layer 0–40 cm characterized the whole humus layer for the monitoring test polygon at the territory of experimental station “Oroshaemaya” in Volgograd Region (Russia) at the south of Volga Upland are submitted. Mentioned indicators characterize arable land in crop rotations on rain-fed and irrigated soils and 50-year fallow at 7 dynamic plots with loamic agrochestnut soils and accumulative-carbonate agrozems formed from pale-brown sandy loams (Haplic Kastanozem (Loamic, Aric)). To select monitoring objects, a multi-time soil line coefficient map and a retrospective analysis of remote sensing data for 40 years and soil survey were used. Each dynamic plot 30 × 30 m includes 9 individual points with differential soil sampling by depth from thin 5- or 10-cm layers. Variation coefficient in space increases from 5–10 to 30–40% due to increasing of the layer depth. On arable land, a uniform vertical distribution of SOC content within arable topsoil is justified. On fallow, accumulative type of vertical distribution SOC content with maximum near surface in light-humus postagrogenic horizon with sod is regenerated. Experimental evaluations of SOC content and storages are comparable with existing materials on light-chestnut soils at interfluve of Volga and Don. The selected objects are representative for monitoring. For the 0–30 cm layer, the minimum significant difference in SOC storages averages 3.4 t/ha with a variation from 2.7 to 4.6 t/ha. The comparison of SOC stocks of different dynamic plots is significantly influenced by the vertical distribution of soil bulk density, which depends on anthropogenic impact.

Keywords: agrochestnut soils, accumulative-carbonate agrozems, rain-fed arable land, irrigation, agricultural fallow, solonetzic soils