

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВИДА УГОДЬЯ И ПОЧВООБРАЗУЮЩИХ ПОРОД НА СОДЕРЖАНИЕ И ЗАПАСЫ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В МЕЛИОРИРОВАННЫХ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ, ТВЕРСКАЯ ОБЛАСТЬ

© 2024 г. Н. И. Лозбенев^{a,*} (<https://orcid.org/0000-0003-0377-3124>),
Д. Н. Козлов^a (<https://orcid.org/0000-0003-0103-0300>),
П. П. Филь^a (<https://orcid.org/0000-0002-9851-5381>),
Н. Б. Хитров^a (orcid.org/000-0001-5151-5109),
П. М. Шилов^a (<https://orcid.org/0000-0003-4113-6396>)

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

*e-mail: nlozbenev@mail.ru

Поступила в редакцию 20.05.2024 г.

После доработки 28.06.2024 г.

Принята к публикации 30.06.2024 г.

Представлены результаты оценки базового уровня содержания, запасов органического углерода ($C_{\text{орг}}$), плотности почв, показателей их пространственного варьирования и дифференцированно-вертикального распределения в пределах слоя 0–40 см в агродерново-подзолистых почвах на морене (Albic Gleyic Retisols (Episiltic, Anoloamic, Agric, Ochric)) и агродерново-подзолах на песках (Albic Podzols (Arenic, Agric, Ochric)) на мелиорированных закрытым дренажом пашне, сенокосе и залежах на 13 динамических площадках тестового полигона в Тверской области, Россия. Установлена высокая пространственная вариабельность содержания $C_{\text{орг}}$ в почвах на малых расстояниях (площадка 30 × 30 м), которая в 5–10 раз выше воспроизводимости определения показателя методом сухого сжигания. Оценки среднеквадратического отклонения запасов $C_{\text{орг}}$ нелинейно увеличиваются по мере увеличения мощности оцениваемого слоя от 1–5 т/га для слоя мощностью 5 см до 10–20 т/га для слоя 0–40 см. На основе дифференцированного отбора образцов почв по глубине из тонких слоев в пределах слоя 0–40 см установлено следующее. На пашне в севообороте отмечаются равномерное вертикальное распределение $C_{\text{орг}}$ в пределах пахотного горизонта и статистически незначимые различия запасов $C_{\text{орг}}$ в слоях 0–10 и 10–20 см. В почвах на морене после вегетации многолетних трав в течение 5 лет и на залежах длительностью от 5 до 20 лет формируется дернина мощностью 3–10 см, аккумулятивное вертикальное распределение $C_{\text{орг}}$ с максимумом возле дневной поверхности при отсутствии значимых различий запасов $C_{\text{орг}}$ в верхней и нижней частях бывшего пахотного горизонта. В почвах на песках выявлены аналогичные закономерности на общем фоне более низкого содержания и запасов $C_{\text{орг}}$.

Ключевые слова: песчаные почвы, агродерново-подзолы, агродерново-подзолистые почвы, пашня, сенокос, залежь, многолетние травы, пространственное варьирование

DOI: 10.31857/S0032180X24120047, EDN: JDQIMK

ВВЕДЕНИЕ

Осознание проблемы глобального изменения климата усилило заинтересованность мирового сообщества в низкоуглеродном развитии экономики. Киотская и Парижская конференции обозначили научно-правовые рамки этого направления. Во исполнение решений международного

сообщества в нашей стране создается национальная система мониторинга климатически активных газов, которая призвана служить основой правовой регламентации выбросов и утилизации таких газов и проведения экологической (низкоэмиссионной) трансформации отраслей экономики Российской Федерации [21, 22]. В настоящее время система мониторинга климатически активных веществ в

РФ включает в себя наблюдения Росгидромета. Согласно Национальному кадастру антропогенных выбросов [27] вклад сельскохозяйственных угодий РФ в баланс парниковых газов в секторе “Землепользование, изменения в землепользовании и лесное хозяйство” составляет 13.7%. Однако неопределенность этой оценки крайне высока, поскольку баланс считается по показателям биомассы сельскохозяйственных культур и изменения запасов углерода почвы уровня 1 Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) по умолчанию, т.е. без учета особенностей природных и хозяйственных условий РФ [50].

Для решения этой научно-методической проблемы в составе консорциума ведется выполнение работ на тему “Разработка системы мониторинга и учета данных о потоках парниковых газов и углеродного цикла в наземных экосистемах Российской Федерации” [23]. В нее входит задача разработки и научного обоснования сбора, обработки, анализа, хранения и использования достоверных и международно-признаваемых наблюдаемых и расчетных данных для объективной оценки показателей бюджета углерода в агроэкосистемах Российской Федерации как компонента Единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ.

Запасы углерода в сельскохозяйственных почвах России весьма значительны и играют важную роль в углеродном балансе планеты. Согласно данным карты глобальных запасов органического углерода в почвах (GSOCmap ФАО ООН) [41], Россия входит в число десяти стран с самыми высокими углеродными запасами в почвах. На сегодняшний день в российском и мировом сообществе существуют значительные разночтения в применяемых подходах, методах и конкретных оценках запасов углерода в почвах. Она проводится по моделям и с использованием прямых наблюдений. Модельные подходы применяются для региональных [26, 52] и глобальных расчетов [49, 57]. В крупнорегиональных обзорах по территории России приводятся результаты оценок запасов и бюджета углерода в почвах, в том числе сельскохозяйственных земель [59, 61, 67]. В некоторых странах оценки содержания органического вещества почвы в региональном масштабе проводятся на основе результатов государственного мониторинга сельскохозяйственных земель, аналогичным работам российской агрохимической службы министерства сельского хозяйства [65, 66]. Также обсуждается проблема пространственно-временной изменчивости запасов углерода на разных пространственных уровнях [38, 55].

Российские исследования, посвященные анализу содержания углерода в почвах сельскохозяйственных угодий, часто содержат противоречивые данные о том увеличиваются или уменьшаются

запасы углерода в зависимости от истории землепользования, биоклиматических и литологических факторов [1, 2, 13, 33]. Для оценок постагрогенной динамики широко применяются методы хронорядов, когда в пространстве находят аналогичные в почвенно-ландшафтном отношении участки в разных стадиях сукцессионного развития [2, 6, 13, 14, 17, 25, 26, 30, 33].

Большое количество иностранных исследований посвящено изменению содержания и запасов углерода в почвах при изменении технологий обработки почвы, систем земледелия или землепользования [56, 72]. В них даются оценки эффективности применения разных типов агротехнологий для накопления органического вещества в почвах [40, 70], рассматривается соотношение вкладов почвообразующих пород и генетических типов почв в формирование пула углерода при разных технологиях земледелия [42, 47, 48].

Значительные разночтения имеются в вопросах выбора методики отбора образцов. Встречаются предложения об отборе по регулярной сетке [42], случайным образом [69] или на ключах от 3 до 9 точек послойно на глубину гумусированной толщи на небольших расстояниях с определением в одной или всех точках плотности почв для сравнения запасов углерода в разных типах землепользования [43, 44, 47, 58, 62]. Послойный отбор до глубины 100 см по транsekтам бывает совмещен с полевыми или стационарными измерениями дыхания почв [64], что позволяет оценить изменение запасов углерода и интенсивности дыхания при изменении типа землепользования. Также встречается, на наш взгляд, не вполне обоснованный и критикуемый [63] подход с применением педотрансферных функций для экстраполяции на нижележащие слои почв содержания углерода и плотности почв [64].

В последнее десятилетие активно обсуждается использование эквивалентной массы почвы вместо фиксированной мощности слоя при определении запасов углерода, однако серьезные разночтения при использовании этого метода разными научными группами не позволяют уверенно переходить к его применению [71].

Многие работы, проводимые по всему миру, констатируют значительное пространственно-временное варьирование запасов углерода в почвах [38], однако до сих пор не выработана единая методика учета запасов углерода в почвах таким образом, чтобы можно было достоверно выявить различия между типами землепользования и типами почв. Отсюда вытекает необходимость разработки и апробации такой методологии.

Цель статьи – представить результаты оценки базового уровня содержания и запасов $C_{\text{орг}}$ в агродерново-подзолистых почвах на морене и

агродерново-подзолах на песках на мелиорированной пашне, сенокосе и залежах тестового полигона ВНИИМЗ (Всероссийский научно-исследовательский институт мелиорированных земель – филиал Федерального исследовательского центра Почвенный институт имени В.В. Докучаева).

ОБЪЕКТЫ

Объектом исследования выступают почвы и сельскохозяйственные угодья тестового полигона Всероссийского научно-исследовательского института мелиорированных земель (ВНИИМЗ) в Калининском районе Тверской области (пос. Эммаус, около г. Тверь) (рис. 1а, 1d). Он расположен в природной зоне южной тайги с хвойно-широколиственными лесами [15, 16], по природно-сельскохозяйственному районированию СССР [24] – в Западной подпровинции Среднерусской провинции. Согласно физико-географическому

районированию Нечерноземного центра [3] участок входит в Верхневолжскую низменную озерно-зандровую провинцию, физико-географический район Калининская гряда (рис. 1b).

Агроклиматические показатели рассчитаны по данным метеостанции “Тверь” (Всемирная метеорологическая организация № 27402), находящейся в 17 км от тестового полигона. Сумма осадков за год в среднем за период 2018–2022 гг. составила 660 мм, минимум – 548 мм, максимум – 686 мм, что немного меньше по сравнению с 30-летним периодом 1992–2022 гг. – среднее 674 мм, минимум – 449 мм, максимум – 986 мм. В течение вегетационного периода с мая по октябрь выпадает 50–70% годовой суммы осадков, за последние 30 лет в среднем 413 мм, минимум – 188 мм, максимум – 658 мм. Среднее значение годового коэффициента увлажнения (отношение потенциальной испаряемости к сумме осадков) за последние 30 лет равно 1.2, гидротермического коэффициента Селянинова – 1.4.

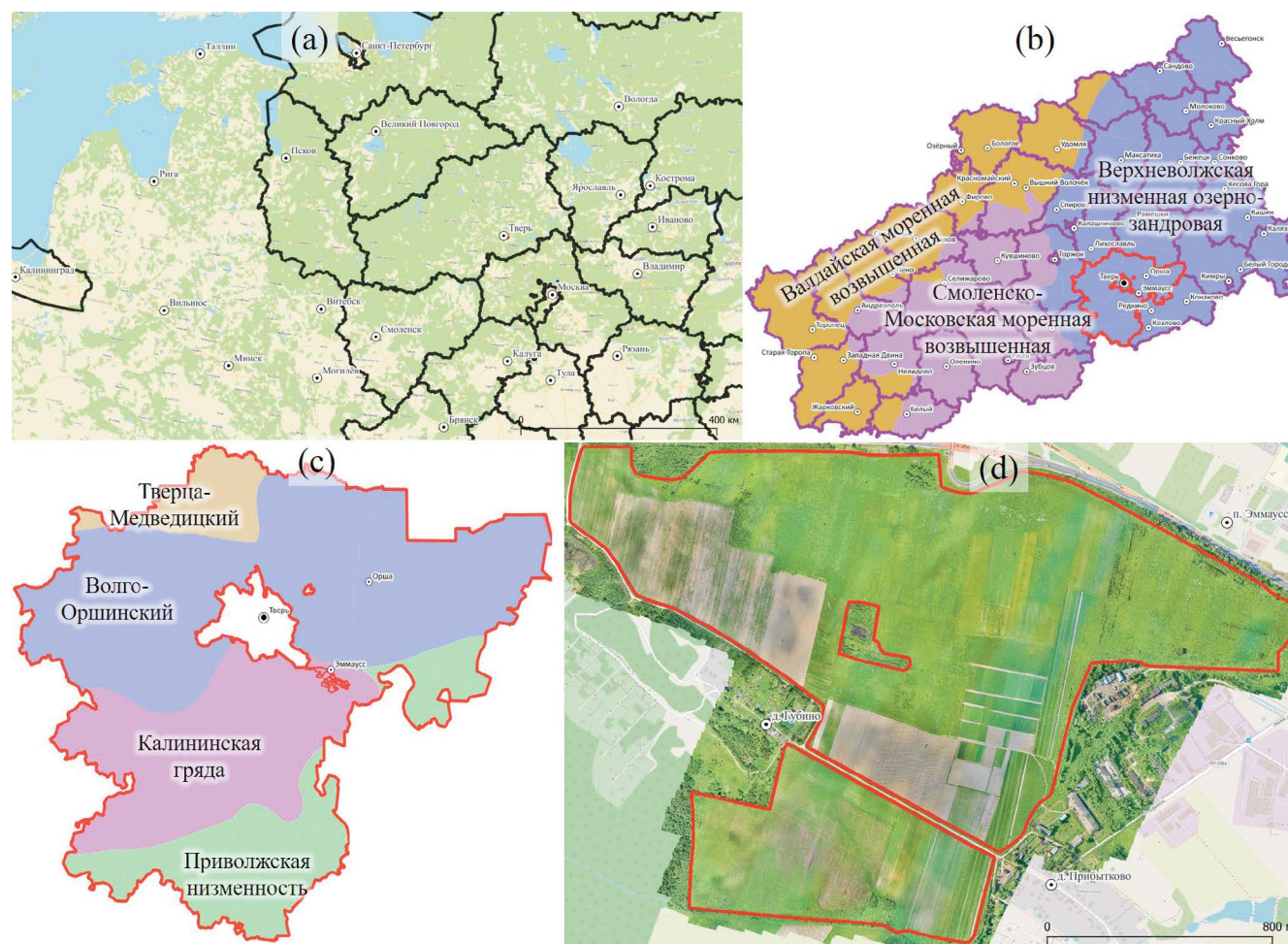


Рис. 1. Географическое положение тестового полигона ВНИИМЗ: (а) – северо-запад европейской части России; (b) – физико-географическое и административно-территориальное деление Тверской области; (с) – физико-географическое деление Калининского района; (d) – ортофотоплан тестового полигона.

Средняя годовая сумма температур выше 5°C за последние 30 лет составила 2654.9°C с тенденцией увеличения в последние 5 лет – 2743.6°C. Аналогично изменяется средняя годовая сумма температур выше 10°C – за последние 30 лет 2305.1°C, за последние 5 лет – 2337.8°C.

Территория находится в полосе перехода моренной Калининской возвышенности к зандровой Верхневолжской низменности. Центральная часть участка с абсолютными высотами до 165 м представляет собой моренный холм, перекрытый тонким чехлом покровных отложений. Южная и северная части участка с высотами около 155 м – краевые части зандров и террас, сложенные двучленными отложениями – песками и супесями, перекрывающими суглинистую морену (рис. 2а).

Почвообразующие породы представлены двумя генетическими типами отложений – моренными суглинками и плащом зандровых и аллювиальных песков и супесей разного возраста. Поверхность моренных суглинков имеет сложный внутренний микрорельеф в результате частичного ее размыва. Мощность поверхностного плаща песков и супесей сильно варьирует в пространстве от 10–20 см до 2–3 м. В результате на территории тестового полигона преобладают двучленные почвообразующие породы с разной мощностью облегченного по гранулометрическому составу поверхностного плаща (рис. 2б).

Сельскохозяйственные угодья в 2022 г. на тестовом полигоне были представлены пашней и залежами разного возраста. Дополнительно для

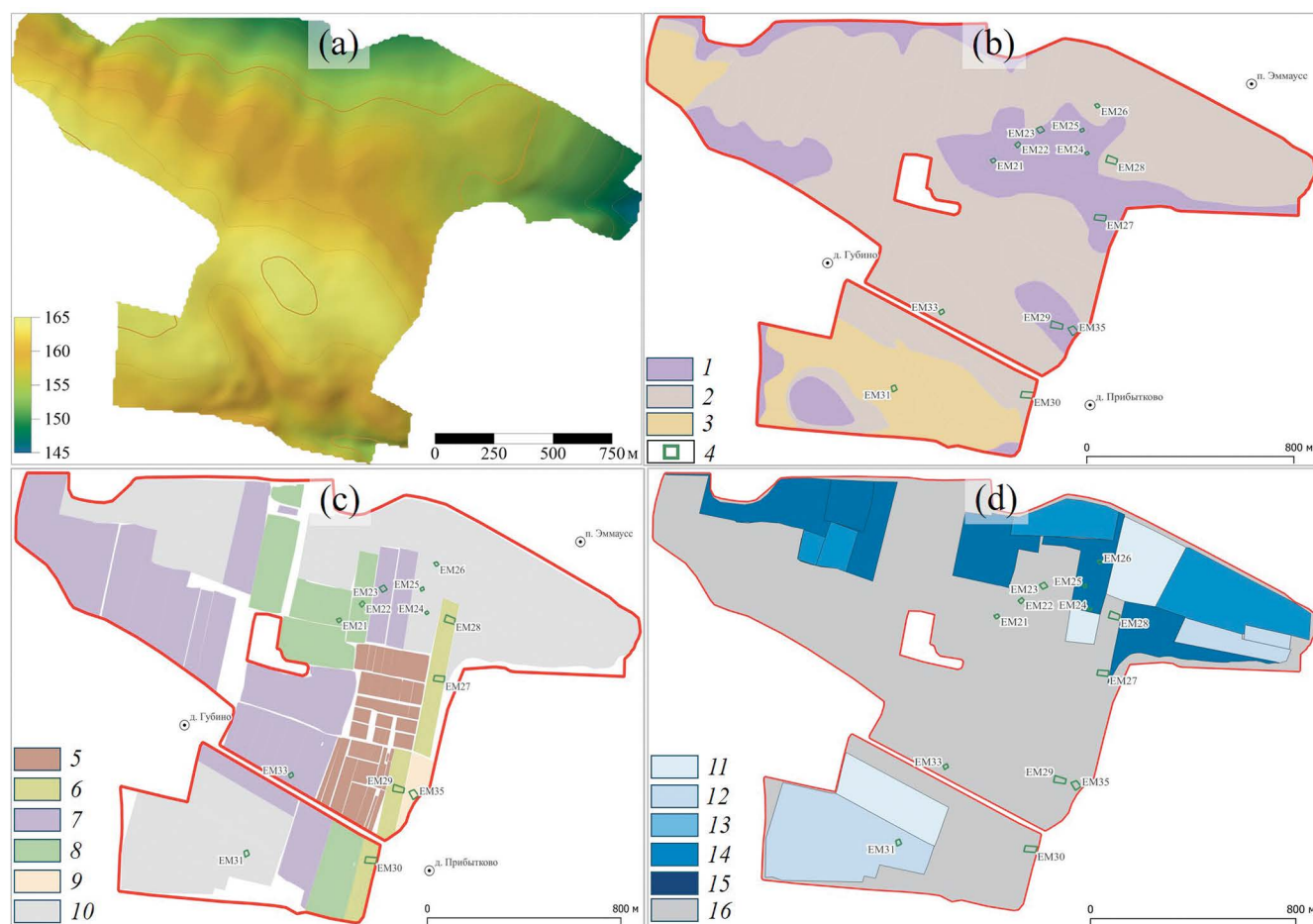


Рис. 2. Геолого-геоморфологическая и хозяйственная структура тестового полигона: (а) – абсолютные высоты, м; (б) – почвообразующие породы, цифрами обозначена глубина верхней границы суглинистой морены: 1 – преимущественно до 50 см, с варьированием в интервале 20–60 см на расстояниях 20–40 м; 2 – преимущественно от 50 до 100 см с варьированием 20–50 см на расстояниях до 50 м; 3 – преимущественно более 100 см; 4 – положение динамических площадок и их названия; (с) – схема сельскохозяйственных угодий и видов режимов их использования на конец 2022 г., цифрами обозначены: 5 – пашня, опытные посевы, 6 – пашня, агроландшафтные посевы “трансекта”, 7 – пашня, производственные посевы, 8 – многолетние травы длительностью более 5 лет, 9 – сеяные многолетние травы с выпасом коров более 6 лет, 10 – залежь; (д) – ориентировочные сроки длительности залежи: 11 – до 5 лет, 12 – 5–10 лет, 13 – 10–20 лет, 14 – 20–30 лет, 15 – более 30 лет; 16 – пашня.

исследований использовали участок сенокоса, расположенный в 3 км к востоку также на землях ВНИИМЗ. Большая часть полигона была осушена в 1980-х годах системой закрытого дренажа, заложенного на глубину 1 м с расстоянием между дренами 20–40 м [37]. В пределах пашни выделено пять групп режимов ее использования (рис. 2с): (1) экспериментальные делянки разного размера, на которых ведут полевые опыты сотрудники ВНИИМЗ; (2) особый агроландшафтный опыт с севооборотом: яровая пшеница—горчица—озимая рожь—овес—многолетние травы (два года); (3) массивы сеяных многолетних трав с длительностью бессменного произрастания 6 и более лет [18, 19]; (4) небольшой участок сеяных многолетних трав, который около 10–15 лет используется для выпаса коров [7, 8]; (5) производственные поля, на которых в севообороте возделываются однолетние и многолетние травы на семена или сено, озимая и яровая пшеница, озимая рожь, горчица, картофель. Во второй половине XX в. вся территория полигона использовалась под пашню. В 2022 г., когда проводился отбор образцов почв на динамических площадках, земли, находящиеся в залежи 5 до 40 лет (рис. 2d), были расположены в южной и северной частях полигона. Массив пашни с разным режимом использования был сосредоточен в центральной части полигона.

Согласно почвенно-экологическому районированию [9] исследуемая территория входит в II — бореальный географический пояс, II — Европейско-Западно-Сибирскую таежно-лесную почвенно-биоклиматическую область, Е — зону дерново-подзолистых почв южной тайги, ЕЗ — среднерусскую южно-таежную провинцию, ЕЗ V — Бежецкий округ: почвенный округ дерново-мелко- и неглубокоподзолистых суглинистых почв на моренных отложениях, местами перекрытых покровными суглинками. Более детальная характеристика почв и почвенных комбинаций тестового полигона и динамических площадок представлена в разделе “Результаты”.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для описания почвенно-ландшафтных условий тестового полигона использован широкий спектр архивных материалов и собственных обследований геолого-геоморфологических условий и структуры почвенного покрова. Геоморфологические условия полигона охарактеризованы по цифровой модели рельефа разрешением 2 м, построенной с использованием лазерного сканера АГМ-МС1 базируемого на Velodyne Lidar на борту беспилотного воздушного судна Геоскан — 401 и базовой станции Stonex S9III+.

Геологические условия — на основе карты четвертичных отложений масштаба 1 : 200 000, которая

дала информацию об общем составе отложений и чередовании слоев. Более подробная информация получена из почвенно-мелиоративного плана осушенной части земель масштаба 1 : 5000. На нем отображены положение магистральных и второстепенных осушительных каналов, а также схема закрытого дренажа и состав отложений.

Кроме того, использованы почвенная карта и карта агропроизводственных групп почв масштаба 1 : 10000 бывшего ОПХ “Заветы Ленина”, составленные в 1980-е годы в ходе пятого тура обследования ГИПРОЗЕМа. Карты обладают высокой точностью описания структуры почвенного покрова и использовались для составления обновленной почвенной карты и размещения динамических площадок.

В течение сезона 2022 г. было проведено **почвенное обследование** на базе архивных и дистанционных материалов. Предварительно выполнена оптическая съемка полей с беспилотного летательного аппарата и составлен ортофотоплан разрешением 15 см/пиксел. На основе этой и лидарной съемок, архивных материалов выполнено полевое обследование, которое включало описание 147 разрезов и буровых, в которых фиксировались морфология почвы, литология, глубина грунтовых вод, состав и состояние растительности. Определено, что для почв тестового полигона характерны два ведущих фактора, определяющих их классификационное различие: глубина залегания суглинистой щебнистой морены московского возраста, а также глубина и интенсивность проявления оглеения. По соотношению этих факторов и собственным генетическим свойствам почв в пределах землепользования института выделено 14 микроструктур почвенного покрова. Плакорные позиции на моренно-водноледниковых холмах занимают дерново-подзолистые не оглеенные и глееватые супесчано-среднесуглинистые пахотные осушенные почвы, залегающие на моренных суглинках. В микроложбинах сформировались профильно-глееватые варианты этих почв. Значительные площади в краевых частях холмов занимают двучлены с мощностью песчаного слоя 50–100 см или более 1 м (рис. 2b). Для них характерны дерново-подзолы обычные, глееватые и глеевые (в крупных ложбинах) супесчаные пахотные осушенные почвы, сформированные на песках, подстилаемых моренным суглинком с большой глубины.

Определение последней даты открытой поверхности почвы. Возможность спектрально обнаружить открытую поверхность почвы усложняется короткими временными промежутками: весной между сходом снежного покрова и началом вегетации, и осенью между выполнением обработок почвы, и установлением снежного покрова. В это время года над тестовым полигоном часто устанавливается облачная погода, препятствующая зондированию

поверхности. Влияние оказывает изменчивость шероховатости и влажности поверхности [28, 60]. Следовательно, получение достоверной информации о наличии или отсутствии открытой поверхности почвы возможно только с применением мультимедийных данных.

Для решения задачи о выявлении последнего года наличия открытой поверхности почвы в пределах границ полей была использована платформа Google Earth Engine [68]. В качестве расчетных спектральных данных использовали все малооблачные сцены (<10%) в период май–апрель и октябрь–ноябрь систем Landsat 4, Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8 и Landsat 9 с 1985 по 2022 гг. Для анализа использовали данные из коллекции Tier 1, затем их обрабатывали алгоритмами LEDAPS [53, 54]. После выполнения калибровки и гармонизации спектральных областей данные разных систем сканирования объединяли в шесть каналов: синий (B), зеленый (G), красный (R), ближний инфракрасный (NIR), коротковолновый инфракрасный 1 (SWIR1) и коротковолновый инфракрасный 2 (SWIR2). Для выявления открытой поверхности почвы применяли алгоритм GEOS3 [45]. Для каждой полученной сцены рассчитывали индексы NDVI, NBR2 и VNSIR:

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{NIR} - \text{R})}{(\text{NIR} + \text{R})}, \quad (1)$$

$$\text{NBR2} = \frac{(\text{SWIR1} - \text{SWIR2})}{(\text{SWIR1} + \text{SWIR2})}, \quad (2)$$

$$\text{VNSIR} = 1 - ((2\text{R} - \text{G} - \text{B}) + 3(\text{SWIR2} - \text{NIR})), \quad (3)$$

где R, G, B, NIR, SWIR1, SWIR2 – гармонизированные спектральные каналы систем Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8, Landsat 9. В качестве порога открытой поверхности почвы для NDVI использовали диапазон от –0.25 до 0.25, для NBR2 от –0.3 до 0.1, а для VNSIR принимали значения <0.9 [46]. Каждому пикселю для каждого года с 1985 по 2022 гг. в пределах полей присваивали значения: 1 – открытая поверхность почвы в текущем году встречалась, 2 – открытая поверхность не встречалась. Затем для каждого пикселя в пределах полей присваивали значение последнего по хронологии года, в котором суммарно во всех сценах в течение года открытая поверхность почвы встречалась более чем на 95% площади, результат работы алгоритма показан на рис. 2d. Алгоритм реализован в Google Earth Engine с использованием JavaScript API, разрешение данных 30 м.

Методика отбора образцов для определения запасов углерода. Для оценки базового уровня содержания, запасов органического углерода и характеристик их варьирования в пространстве и по глубине

в почвах сельскохозяйственных угодий заложена серия динамических площадок. Каждая площадка имеет размер 30 × 30 м и включает 9 индивидуальных точек опробования, расположенных крестом. Расстояние между соседними точками вдоль луча 6 м. Во всех 9 точках выполнен дифференцированный отбор образцов почв по глубине тонкими слоями толщиной 5–10 см на содержание органического углерода [35] по схеме 0–5, 5–10, 10–20, 20–30, 30–40 см. Морфологическое описание почвенного профиля и идентификация почв проведены по трем классификациям почв: СССР (далее К-1977) [11], России (далее РК-2004(22)) [10, 20, 36, 37] и международной (далее WRB) [51]. 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. На динамических площадках с почвами, содержащими гравий и камни, для пахотного горизонта в целом оценивали содержание этой фракции частиц из образцов массой более 2 кг путем отсева их на сите с отверстиями 2 мм и взвешивания, вводя поправку на влажность мелкозема. Всего на одной динамической площадке отбирали 45 индивидуальных образцов на содержание органического углерода (9 точек по 5 глубинам), 25 образцов на плотность и влажность почв (5 повторений на 5 глубинах) и, если в этом была необходимость, 9 образцов из пахотного горизонта в целом на содержание фракции частиц >2 мм.

Содержание органического углерода во всех образцах определяли методом сухого сжигания на анализаторе Метавак CS производства ООО НПО Эксан, Россия. В исследованных почвах отсутствуют карбонаты, поэтому общее содержание углерода, полученное методом сухого сжигания, принимали за содержание органического углерода. В 41 образце дополнительно содержание органического углерода определяли методом Тюрина по ГОСТ 26213 [4]. Состоятельность применения именно этого подхода обоснована в работе Когута [12].

В октябре 2022 г. заложено 13 динамических площадок наземного мониторинга на разных сельскохозяйственных угодьях и почвообразующих породах (табл. 1, рис. 2, табл. S1).

Запасы $C_{\text{орг}}$ в отдельных слоях рассчитывали по уравнению:

$$\text{St.SOC} = C h \rho (1 - fr),$$

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

Таблица 1. Общая характеристика динамических площадок (отбор 19–21 октября 2022 г.)

Номер	Угодье	Рельеф	Высота, м	Растительность	Почвенный покров и почвообразующие породы
ЕМ-21	Пашня, многолетние травы 6 лет	Ровный пологий склон, северная экспозиция, уклон до 1°	158.2	Многолетние травы с 2018 г.: бобово-злаковая травосмесь на основе клевера лугового (<i>Trifolium pratense</i> L.), люцерны изменчивой (<i>Medicago x varia</i> Arcang.) и злаковых трав: тимофеевки луговой (<i>Phleum pratense</i> L.) и овсяницы луговой (<i>Festuca pratensis</i> L.).	Мозаика агродерново-подзолистых глееватых супесчано-среднесуглинистых почв на морене (Chromic Stagnic Retisol (Loamic, Aric, Cutanic, Differentic, Ochric, Raptic)) и агродерново-подзолов глееватых супесчано-песчаных (Stagnic Albic Podzol (Anoarenic, Endoloamic, Abruptic, Aric)) на двучленных отложениях (песок на морене)
ЕМ-22	Пашня, многолетние травы 6 лет	Ровный пологий склон, северная экспозиция, уклон 1°	157.5	Многолетние травы с 2019 г.: бобово-злаковая травосмесь на основе клевера лугового (<i>Trifolium pratense</i> L.), люцерны изменчивой (<i>Medicago x varia</i> Arcang.) и злаковых трав: тимофеевки луговой (<i>Phleum pratense</i> L.) и овсяницы луговой (<i>Festuca pratensis</i> L.).	Мозаика агродерново-подзолистых глееватых супесчано-среднесуглинистых почв на морене (Chromic Stagnic Retisol (Loamic, Aric, Cutanic, Differentic, Ochric, Raptic)) и агродерново-подзолов глееватых супесчано-песчаных (Stagnic Albic Podzol (Anoarenic, Endoloamic, Abruptic, Aric)) на двучленных отложениях (песок на морене)
ЕМ-23	Пашня, первый год севооборота после поднятия пласта многолетних трав	Ровный пологий склон, северная экспозиция, уклон 1.2°	156.7	Стерня пшеницы, предшественник — многолетние травы	Мозаика агродерново-подзолистых глееватых супесчано-среднесуглинистых почв на морене (Chromic Stagnic Retisol (Loamic, Aric, Cutanic, Differentic, Ochric, Raptic)) и агродерново-подзолов глееватых супесчано-песчаных (Stagnic Albic Podzol (Anoarenic, Endoloamic, Abruptic, Aric)) на двучленных отложениях (песок на морене)
ЕМ-24	Залежь 5 лет	Ровный пологий склон, северная экспозиция, уклон до 1°	157.2	Сорная растительность: пырей (<i>Elymus repens</i>), ежа сборная (<i>Dactylis glomerata</i>)	Мозаика агродерново-подзолистых глееватых супесчано-среднесуглинистых почв на морене (Chromic Stagnic Retisol (Loamic, Aric, Cutanic, Differentic, Ochric, Raptic)) и агродерново-подзолов глееватых супесчано-песчаных (Stagnic Albic Podzol (Anoarenic, Endoloamic, Abruptic, Aric)) на двучленных отложениях (песок на морене)

Продолжение табл. 1

Номер	Угодье	Рельеф	Высота, м	Растительность	Почвенный покров и почвообразующие породы
ЕМ-25	Залежь бо- лее 30 лет	Ровный пологий склон, север- ная экспозиция, уклон 1°	156.3	Сорная растительность: пырей (<i>Elymus repens</i>), ежа сборная (<i>Dactylis glomerata</i>)	Мозаика агродерново-под- золистых глееватых супесча- но-среднесуглинистых почв на морене (Chromic Stagnic Retisol (Loamic, Aric, Cutanic, Differentic, Ochric, Raptic)) и агродерново-подзолов гле- еватых супесчано-песчаных (Stagnic Albic Podzol (Anoarenic, Endoloamic, Abruptic, Aric)) на двучленных отложениях (песок на морене)
ЕМ-26	Залежь бо- лее 30 лет	Ровный пологий склон, север- ная экспозиция, уклон до 1°	154.3	Разреженный покров сор- ных трав	Агродерново-подзолы гле- еватые супесчано-песча- ные (Stagnic Albic Podzol (Anoarenic, Endoloamic, Abruptic, Aric)) на песке, под- стилаемом с 90–100 см сугли- нистой мореной
ЕМ-27	Пашня в севообо- роте	Вытянутая во- гнутая поверх- ность (широкая ложбина) на пологом склоне восточной экс- позиции, уклон до 1°	156.7	Стерня озимой ржи, предшественник — тра- вы 2 года (бобово-злако- вая (клеверово (<i>Lagopus pratensis</i>)-тимофеечная (<i>Phleum pratense</i>)) тра- восмесь)	Мозаика агродерново-под- золистых глееватых супес- чано-среднесуглинистых почв на морене (Chromic Stagnic Retisol (Loamic, Aric, Cutanic, Differentic, Ochric, Raptic)) и агродерново-под- золов глееватых супесча- но-песчаных (Stagnic Albic Podzol (Anoarenic, Endoloamic, Abruptic, Aric)) на двучленных отложениях (песок на морене)
ЕМ-28	Пашня в севообо- роте	Ровный поло- гий склон, се- веро-восточная экспозиция, уклон 1°	156.3	Стерня озимой ржи, предшественник — тра- вы 2 года (бобово-злако- вая (клеверово (<i>Lagopus pratensis</i>)-тимофеечная (<i>Phleum pratense</i>)) тра- восмесь)	Мозаика агродерново-под- золистых глееватых супес- чано-среднесуглинистых почв на морене (Chromic Stagnic Retisol (Loamic, Aric, Cutanic, Differentic, Ochric, Raptic)) и агродерново-под- золов глееватых супесча- но-песчаных (Stagnic Albic Podzol (Anoarenic, Endoloamic, Abruptic, Aric)) на двучленных отложениях (песок на морене)
ЕМ-29	Пашня в севообо- роте	Ровный пологий склон, восточ- ная экспозиция, уклон 1°	163.9	Стерня озимой ржи, предшественник — тра- вы 2 года (бобово-злако- вая (клеверово (<i>Lagopus pratensis</i>)-тимофеечная (<i>Phleum pratense</i>)) тра- восмесь)	Мозаика агродерново-под- золистых глееватых супес- чано-среднесуглинистых почв на морене (Chromic Stagnic Retisol (Loamic, Aric, Cutanic, Differentic, Ochric, Raptic)) и агродерново-под- золов глееватых супесча- но-песчаных (Stagnic Albic Podzol (Anoarenic, Endoloamic, Abruptic, Aric)) на двучленных отложениях (песок на морене)

Окончание табл. 1

Номер	Угодье	Рельеф	Высота, м	Растительность	Почвенный покров и почвообразующие породы
ЕМ-30	Пашня в севообороте	Ровный пологий склон, южная экспозиция, уклон 1°–1.5°	161.3	Стерня озимой ржи, предшественник — травы 2 года (бобово-злаковая (клеверово (<i>Lagopus pratensis</i>)-тимофеечная (<i>Phleum pratense</i>)) травосмесь)	Агродерново-подзолы глееватые супесчано-песчаные (Stagnic Podzol (Pantoarenic, Buthyloamic, Abruptic, Aric)) на песке мощностью более 1–1.5 м
ЕМ-31	Залежь 9 лет	Ровный пологий склон, южная экспозиция, уклон до 1.5°	162.3	Сорная растительность	Агроземы постагрогенные супесчано-песчаные (Protic Arenosol (Aric, Lamellic)) на песке мощностью более 1.5 м
ЕМ-32	Сенокос	Ровная поверхность, уклон до 1°	136.5	Разнотравно-злаковый луг с примесью сорной растительности	Агродерново-подзолы глееватые постагрогенные супесчано-песчаные (Albic Podzol (Arenic)) на песке мощностью более 1.5 м
ЕМ-35	Пашня с посевом многолетних трав, используемых под выпас коров более 6 лет	Ровный пологий склон, восточная экспозиция, уклон до 1.5°	163.2	Бобово-разнотравно-злаковый луг с примесью сорной растительности	Мозаика агродерново-подзолистых глееватых супесчано-среднесуглинистых почв на морене (Chromic Stagnic Retisol (Loamic, Aric, Cutanic, Differentic, Ochric, Raptic)) и агродерново-подзолов глееватых супесчано-песчаных (Stagnic Albic Podzol (Anoarenic, Endoloamic, Abruptic, Aric)) на двучленных отложениях (песок на морене)

слоя почвы, г/см³; f_r — доля крупной фракции гранулометрических элементов (частиц более 2 мм), безразмерная массовая доля от единицы, г/г. 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 $C_{орг}$ в отдельном слое; (3) запасов $C_{орг}$ в отдельном слое; (4) запасов $C_{орг}$ в обобщенном слое увеличивающейся мощности; (5) разности содержания $C_{орг}$ между соседними слоями в каждой точке; (6) разности содержания $C_{орг}$ 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 квартиль, медиану, верхний квартиль, 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. Динамические площадки на пашне с зернотравяным севооборотом (ЕМ-27, ЕМ-28, ЕМ-29, ЕМ-30) были расположены на участках со стерней ржи, которые находились в состоянии равновесной плотности без нарушения поверхности слоя новыми обработками.

Почвенный покров в северной части (площадки ЕМ-27, ЕМ-28 и ЕМ-29) представлен мозаикой агродерново-подзолистых глееватых супесчано-среднесуглинистых почв на двучленных отложениях с залеганием суглинистой морены в пределах 25–35 см с профилем P1–P2–P3pb–(ELg)–BELg–BTg (Chromic Stagnic Retisol (Loamic, Aric, Cutanic, Differentic, Ochric, Raptic)) и агродерново-подзолов глееватых супесчаных на песках с залеганием

суглинистой морены глубже 60 см, имеющих профиль P1–P2–P3pb–Eg–BF–2BDg (Stagnic Albic Podzol (Anoarenic, Endoloamic, Abruptic, Aric)). По классификации почв СССР (1977) все почвы являются дерново-подзолистыми глееватыми пахотными осушенными. Площадки ЕМ-28 и ЕМ-29 находятся на сравнительно ровных или слабовыпуклых позициях рельефа, площадка ЕМ-27 – в широкой ложбине.

Гумусовый горизонт на указанных трех площадках имеет супесчаный гранулометрический состав с присутствием камней размером до 2–5 см, занимающих не более 1% по объему. Он состоит из трех подгоризонтов P1, P2, P3pb (рис. S2). Поверхностный подгоризонт P1 имеет мощность 5–10 см и наименьшую плотность от 1.25 до 1.33 г/см³ (в среднем 1.29 г/см³) за счет сохранившихся корневых систем ржи, однородную серую окраску и непрочную комковатую структуру. Срединный подгоризонт P2 представляет нижнюю половину ежегодно оборачиваемого пахотного слоя до глубины 20–22 см, также с однородной серой окраской и более высокой плотностью от 1.32 до 1.53 г/см³ (в среднем 1.38 г/см³) (табл. 2).

Нижний подгоризонт P3pb отличается визуально различной морфологической неоднородностью за счет белесых или буроватых мелких (от 1 до 2–5 см в диаметре) морфонов (признак rb), представленных фрагментами припаханных ниже лежащих горизонтов E, EL, BEL, на общем сером фоне. Плотность P3pb незначимо отличается от P2. Нижняя граница P3pb очень неровная, варьирующая в интервале от 25–28 до 30–33 см, что связано с однократным проходом орудий, с помощью которых осуществляли глубокое рыхление, а также деятельностью червей, которые частично перемещают гумусированный материал пахотного слоя в нижележащие горизонты, а из последних белесый и буроватый материал вверх в пахотный.

Минеральные горизонты: песчаные подзолистый E и иллювиально-железистый BF, легкосуглинистый элювиальный EL, переходный элювиально-иллювиальный BEL и среднесуглинистый текстурный горизонт BT – имеют самую высокую плотность от 1.64 до 1.88 г/см³. Хотя содержание гумуса в указанных горизонтах небольшое (обычно менее 0.4% органического углерода), при отборе образцов сплошной колонкой по фиксированным глубинам (в данном случае в слоях 20–30 и 30–40 см) происходит неравномерное смешение нижней части гумусового слоя и негумусированной массы минеральных горизонтов в зависимости от вариации глубины нижней границы гумусового слоя.

Площадка ЕМ-30 расположена на склоне южной экспозиции, сложенном песчаными отложениями мощностью более 100 см, ниже которых залегает легко- и среднесуглинистая морена. Почвы

представлены агродерново-подзолами иллювиально-железистыми глееватыми и неглееватыми супесчано-песчаными (профиль P1–P2–P3pb–E(g)–BF(e)–BCe,f–2Dg) (рис. S3).

Гумусовый антропогенно-преобразованный горизонт супесчаного гранулометрического состава без камней имеет мощность от 27 до 36 см с медианой 30 см. Строение приблизительно такое же, как на вышеописанных площадках. В качестве особенности следует отметить наличие запаханных угольков сгоревших растительных остатков в виде черных мелких точек размером 1–3 мм в горизонтах P3pb и немного в горизонте P2. Под гумусовым горизонтом P в большинстве точек опробования залегает подзолистый песчаный горизонт E, в котором могут присутствовать признаки слабого оглеения (g). Ниже горизонта E, или непосредственно под горизонтом P, когда подзолистый горизонт отсутствует, сформировался иллювиально-железистый красновато-бурый горизонт с большим количеством округлых железистых конкреций диаметром 1–3 мм и сцементированных рудяковых железистых стяжений неправильной формы размером 1–3 см. В отдельных точках опробования он имеет признаки оподзоливания (признак e) в виде белесых мелких морфонов. Горизонты E и BF представлены мелкозернистым песком без камней.

На площадках, которые 5 лет заняты многолетними травами (ЕМ-21, ЕМ-22) после пашни, почвенный покров представлен мозаикой агродерново-подзолистых постагрогенных глееватых легко-среднесуглинистых или супесчано-среднесуглинистых почв на суглинистой морене (профиль AYrz,pa –P2–P3pb–(ELg)–BELg–BTg) и агродерново-подзолов иллювиально-железистых глееватых постагрогенных супесчано-песчаных на двучленах (песок мощностью 60–70 см на морене) (AYrz,pa–P2–P3pb–Eg–BF–2BTg) (рис. S4). В отличие от площадок на полях севооборота, под многолетними травами верхняя часть пахотного горизонта P1 преобразована корневыми системами в серогумусовый горизонт с дерниной AYrz мощностью от 5 до 10 см. Глубже строение профиля сохраняется таким же, как на пашне в севообороте. Для профиля почв площадки характерно наличие камней размером от 2 до 8 см с общим обилием в пределах верхних 40 см около 1% по объему.

Почвы площадки ЕМ-23 в 2022 г. подверглись повторной распашке после 5 лет выращивания многолетних трав. В течение одного года сформировался трехслойный пахотный горизонт P1–P2–P3pb, аналогичный по своему морфологическому строению почвам севооборота.

Площадка на бывшей пашне с посевом многолетних трав, на которой последние годы пасутся коровы (ЕМ-35), по строению почвенного покрова

Таблица 2. Плотность и влажность почв динамических площадок (М – среднее арифметическое; SD – среднеквадратическое отклонение; min – минимум, max – максимум)

Площадка	Глубина, см	Плотность почвы, г/см ³				Влажность, мас. %	
		М	SD	min	max	М	SD
ЕМ-21	1–5	1.17	0.13	1.03	1.27	28.4	4.2
	5–10	1.26	0.13	1.19	1.34	25.9	4.2
	10–14	1.36	0.04	1.31	1.40	23.4	0.3
	20–24	1.47	0.03	1.43	1.49	20.4	0.9
	32–36	1.68	0.15	1.53	1.83	15.0	3.7
ЕМ-22	1–5	1.31	0.02	1.30	1.33	23.7	0.3
	5–10	1.32	0.04	1.29	1.34	22.2	0.8
	10–14	1.33	0.05	1.28	1.39	20.7	0.7
	20–24	1.48	0.15	1.33	1.63	20.2	0.1
	35–39	1.71	0.08	1.61	1.75	13.9	1.0
ЕМ-23	1–5	1.24	0.06	1.17	1.27	18.4	0.5
	5–10	1.29	0.08	1.21	1.34	18.1	0.7
	10–14	1.33	0.08	1.24	1.40	17.7	0.5
	20–24	1.48	0.05	1.44	1.54	17.0	0.3
	35–39	1.52	0.03	1.49	1.54	15.8	1.3
ЕМ-24	1–5	1.05	0.08	0.97	1.12	27.9	1.7
	5–10	1.22	0.19	1.18	1.25	23.5	1.8
	10–14	1.39	0.01	1.38	1.40	19.0	0.7
	20–24	1.42	0.03	1.40	1.45	17.5	0.5
	35–39	1.61	0.04	1.59	1.66	14.9	1.2
ЕМ-25	1–5	1.22	0.07	1.17	1.30	21.2	2.6
	5–10	1.28	0.08	1.24	1.34	20.5	2.6
	10–14	1.34	0.05	1.29	1.38	19.7	0.1
	20–24	1.46	0.02	1.44	1.48	19.4	0.1
	35–39	1.63	0.04	1.59	1.67	15.2	2.1
ЕМ-26	1–5	1.07	0.04	1.03	1.11	22.4	0.8
	5–10	1.23	0.18	1.20	1.26	18.9	0.9
	10–14	1.39	0.03	1.35	1.41	15.4	0.4
	20–24	1.43	0.01	1.42	1.44	14.4	0.5
	35–39	1.64	0.01	1.63	1.65	8.5	0.9
ЕМ-27	1–5	1.29	0.04	1.27	1.34	22.0	0.5
	5–10	1.34	0.07	1.29	1.36	21.2	0.6
	10–14	1.38	0.10	1.31	1.45	20.3	0.4
	20–24	1.37	0.01	1.37	1.37	20.7	0.1
	32–36	1.88	0.03	1.86	1.91	11.9	2.5

Окончание табл. 2

Площадка	Глубина, см	Плотность почвы, г/см ³				Влажность, мас. %	
		М	SD	min	max	М	SD
ЕМ-28	1–5	1.25	0.05	1.20	1.30	20.3	0.4
	5–10	1.29	0.08	1.23	1.36	20.1	0.8
	10–14	1.33	0.09	1.26	1.43	19.8	0.7
	20–24	1.39	0.11	1.29	1.50	21.0	1.8
	35–39	1.81	0.05	1.77	1.87	13.0	0.6
ЕМ-29	1–5	1.33	0.04	1.29	1.37	14.8	0.6
	5–10	1.43	0.12	1.39	1.47	15.1	0.7
	10–14	1.54	0.07	1.49	1.61	15.4	0.5
	20–24	1.56	0.04	1.52	1.60	14.8	0.5
	35–39	1.64	0.04	1.61	1.68	13.6	0.3
ЕМ-30	1–5	1.14	0.05	1.11	1.20	17.7	1.1
	5–10	1.22	0.10	1.18	1.28	17.9	1.3
	10–14	1.31	0.06	1.25	1.37	18.0	0.8
	20–24	1.35	0.09	1.26	1.45	18.2	0.4
	35–39	1.57	0.07	1.53	1.64	9.5	0.5
ЕМ-31	1–5	1.15	0.08	1.07	1.22	11.4	0.6
	5–10	1.20	0.08	1.18	1.24	10.7	0.7
	10–14	1.26	0.04	1.23	1.29	10.0	0.5
	20–24	1.41	0.09	1.31	1.48	9.4	0.2
	32–36	1.61	0.04	1.58	1.65	8.2	0.5
ЕМ-32	1–5	1.03	0.11	0.90	1.11	29.1	0.9
	5–10	1.14	0.14	1.05	1.19	26.1	0.9
	10–14	1.25	0.04	1.20	1.27	23.1	0.1
	20–24	1.29	0.03	1.27	1.33	22.2	1.5
	35–39	1.40	0.01	1.39	1.41	17.1	1.0
ЕМ-35	1–5	1.26	0.08	1.18	1.33	20.9	1.3
	5–10	1.40	0.17	1.34	1.45	18.0	1.3
	10–14	1.55	0.04	1.51	1.57	15.1	0.2
	20–24	1.55	0.02	1.53	1.56	15.0	0.3
	35–39	1.68	0.03	1.66	1.71	12.2	0.8

похожа на площадку под многолетними травами, хотя дернина выражена слабее и составляет 3–5 см.

Залежи (ЕМ-24, ЕМ-25, ЕМ-26, ЕМ-31) заметно различаются между собой (рис. S5).

На территориях с варьирующим на малых расстояниях залеганием морены на глубине 20–60 см (площадки ЕМ-24, ЕМ-25) встречается почвенная

комбинация в виде мозаики, характерная для динамических площадок в севообороте (ЕМ-28, ЕМ-29) и на многолетних травах (ЕМ-21, ЕМ-22) в похожих геоморфологических условиях. В поверхностных горизонтах при наличии хорошо развитой корневой системы в почвах залежей на площадках ЕМ-24 и ЕМ-25 сформировался серогумусовый

горизонт с довольно плотной дерниной (AYrz,pa) мощностью 5–10 см. В бывшем пахотном горизонте залежей встречаются обломки гончарного дренажа.

На участках с плащом песков мощностью более 1 м почвы на залежах представлены агродерново-подзолами постагрогенными супесчаными на песках (ЕМ-26) или агроземами постагрогенными песчаными на песках (ЕМ-31). На площадке ЕМ-26 слабая дернина возникла, но ее образование еще не привело к преобразованию бывшего пахотного горизонта. На площадке ЕМ-31 корневища сорной растительности пронизывают почти весь бывший пахотный горизонт без формирования дернины. В залежах с песчаными почвами в бывшем пахотном горизонте часто заметны черные точки угольков сгоревших растительных остатков.

Можно отметить, что в залежных почвах хорошо выраженная дернина сформировалась в супесчаных пахотных горизонтах при близком залегании морены, тогда как в песчаных почвах с пахотным горизонтом из тонкозернистого песка дернина развита слабо или совсем не образуется.

Почвы на площадке ЕМ-32 на сенокосе представлены агродерново-подзолами иллювиально-железистыми постагрогенными глееватыми супесчано-песчаными на песках. Они имеют профиль AYrz,pa–Ppa–Ppa,pb–Eg–BF. Серогумусовый постагрогенный горизонт с дерниной (AYrz,pa) и нижние части бывшего пахотного горизонта под ним имеют супесчаный гранулометрический состав. Глубже расположенные минеральные горизонты E и BF представлены мелкозернистым песком без камней. Нижняя часть бывшего пахотного горизонта Ppa,pb морфологически сильно гетерогенна за счет перемешивания материала гумусового горизонта с припаханными фрагментами подзолистого горизонта (рис. S6).

Воспроизводимость аналитического определения содержания $C_{орг}$ в почвах тестового полигона получена на основе трехкратного измерения каждого образца на анализаторе Метавак CS. Оценка связи среднего арифметического и среднеквадратического отклонения содержания $C_{орг}$ получена в 614 образцах почв из разных слоев отбора. В 95% случаев среднеквадратическое отклонение меньше 0.04 абс. %, максимум 0.1% (рис. 3а), что соответствует коэффициенту вариации менее 1.6 отн. % в 75% случаев и 3.3 отн. % в 95% случаев (рис. 3с). Отмечается общая тенденция увеличения стандартного отклонения по мере увеличения среднего арифметического, но детерминация слабая ($R^2 = 0.24$).

Пространственное варьирование содержания $C_{орг}$ в отдельных тонких слоях почв в пределах отдельных динамических площадок в 5–10 раз больше аналитической воспроизводимости измерения показателя в индивидуальных образцах (рис. 3а, 3с).

Среднеквадратическое отклонение содержания $C_{орг}$ в отдельном слое, полученное по 9-кратной повторности, составляет от 0.1 до 0.6 абс. %, чаще менее 0.4%. Коэффициент вариации при содержании $C_{орг}$ более 1% в исследованных почвах обычно изменяется в интервале 10–30 отн. %, возрастая до 40–80 отн. % в горизонтах с очень низким содержанием $C_{орг}$.

Абсолютные значения **среднеквадратического отклонения плотности почвы** колеблются в интервале от 0.02 до 0.2 г/см³, чаще менее 0.1 г/см³ независимо от глубины анализируемого слоя в пределах 40 см. Коэффициент вариации плотности почвы редко превышает 10 отн. % (рис. 3б, 3д).

Вертикальное распределение содержания $C_{орг}$ по профилю почв зависит от вида сельскохозяйственного угодья и особенностей его использования (рис. 4, табл. S7). В почвах пашни, используемой в севообороте (динамические площадки ЕМ-23, ЕМ-27, ЕМ-28, ЕМ-29, ЕМ-30), независимо от почвообразующих пород, отмечается равномерное распределение содержания $C_{орг}$ в пределах верхней части пахотного горизонта до глубины 20 см. Значения средних значений содержания $C_{орг}$ в слоях 0–5, 5–10 и 10–20 см во всех парных сравнениях не имеют статистически значимых отличий. Разности между средними указанных слоев изменяются от 0 до 0.1 абс. % при статистически одинаковых среднеквадратических отклонениях содержания $C_{орг}$ в сравниваемых слоях, равных от 0.12 до 0.33 абс. % на разных динамических площадках. В слоях 20–30 см и особенно 30–40 см содержание $C_{орг}$ значительно уменьшается по сравнению с верхней частью пахотного горизонта и с выше лежащим соседним слоем. Это обусловлено несколькими причинами. Во-первых, антропогенно-преобразованный агрогумусовый горизонт Р был создан в 1980-х годах в ходе мелиоративной вспашки до глубины 30 см с внесением удобрений, а предшествующие 10–20 лет ежегодную вспашку с оборотом пласта выполняют на глубину 22 см. Во-вторых, нижняя часть Рзрб в последние годы не подвергается механическому рыхлению и до сих пор сохраняет припаханные фрагменты нижележащих минеральных горизонтов. В-третьих, природные минеральные горизонты E, EL, BF, BEL, BT имеют исходно низкое содержание $C_{орг}$ (рис. 4а, 4с, 4д).

Высокая пространственная вариабельность может быть возможной причиной отсутствия значимости средних между слоями 0–5, 5–10 и 10–20 см, поскольку при такой оценке все 9 точек составляют случайную выборку, которая не учитывает вертикальное сопряжение образцов почвы в каждой точке в отдельности. В связи с этим, дополнительно использовали второй способ обработки данных, заключающийся в оценке значимости отличия от нуля средней разности двух сопряженных рядов данных [5]. Сопряженными рядами выступали

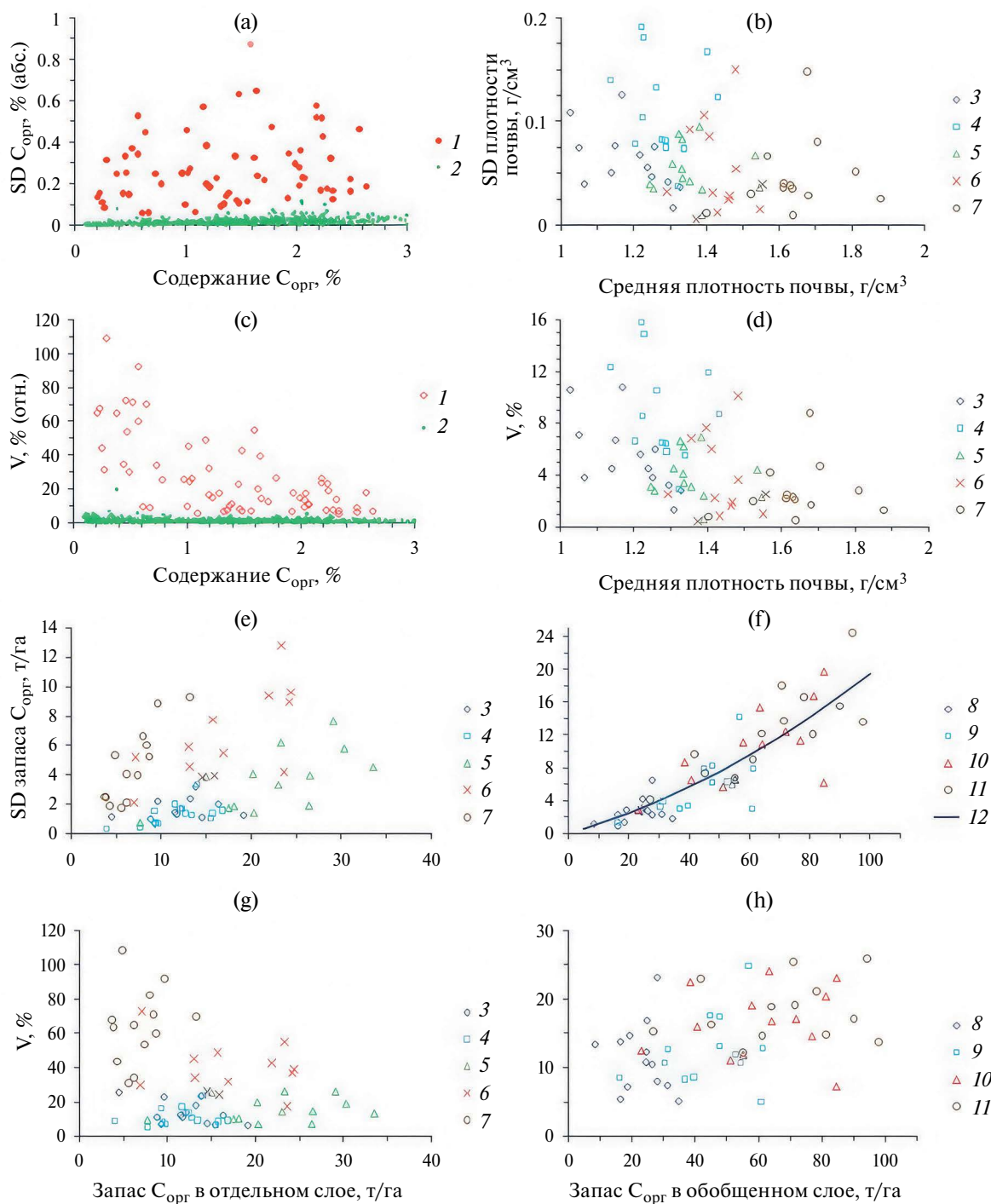


Рис. 3. Пространственное варьирование (1) и аналитическая воспроизводимость (2) содержания $C_{\text{орг}}$ ((a), (c)); варьирование плотности почвы ((b), (d)), запасов $C_{\text{орг}}$ в отдельных ((e), (g)) и обобщенных ((f), (h)) слоях почв в зависимости от средних значений показателя. (a), (b), (e), (f) – абсолютные значения среднеквадратического отклонения (SD), (c), (d), (g), (h) – коэффициент вариации. Отдельные слои 0–5 см (3), 5–10 см (4), 10–20 см (5), 20–30 см (6), 30–40 см (7). Обобщенные слои 0–10 см (8), 0–20 см (9), 0–30 см (10), 0–40 см (11). 12 – тренд: $Y = 0.1075X + 0.0087X^2$, число степеней свободы 50, $R^2 = 0.909$, коэффициенты регрессии значимы. Аналитическая воспроизводимость $C_{\text{орг}}$ по 3-кратным измерениям в 614 образцах почв, пространственное варьирование содержания и запасов $C_{\text{орг}}$ по 5 глубинам в 8 или 9 точках на 13 динамических площадках, пространственное варьирование плотности почвы при 5-кратном измерении в 5 отдельных слоях на 13 динамических площадках.

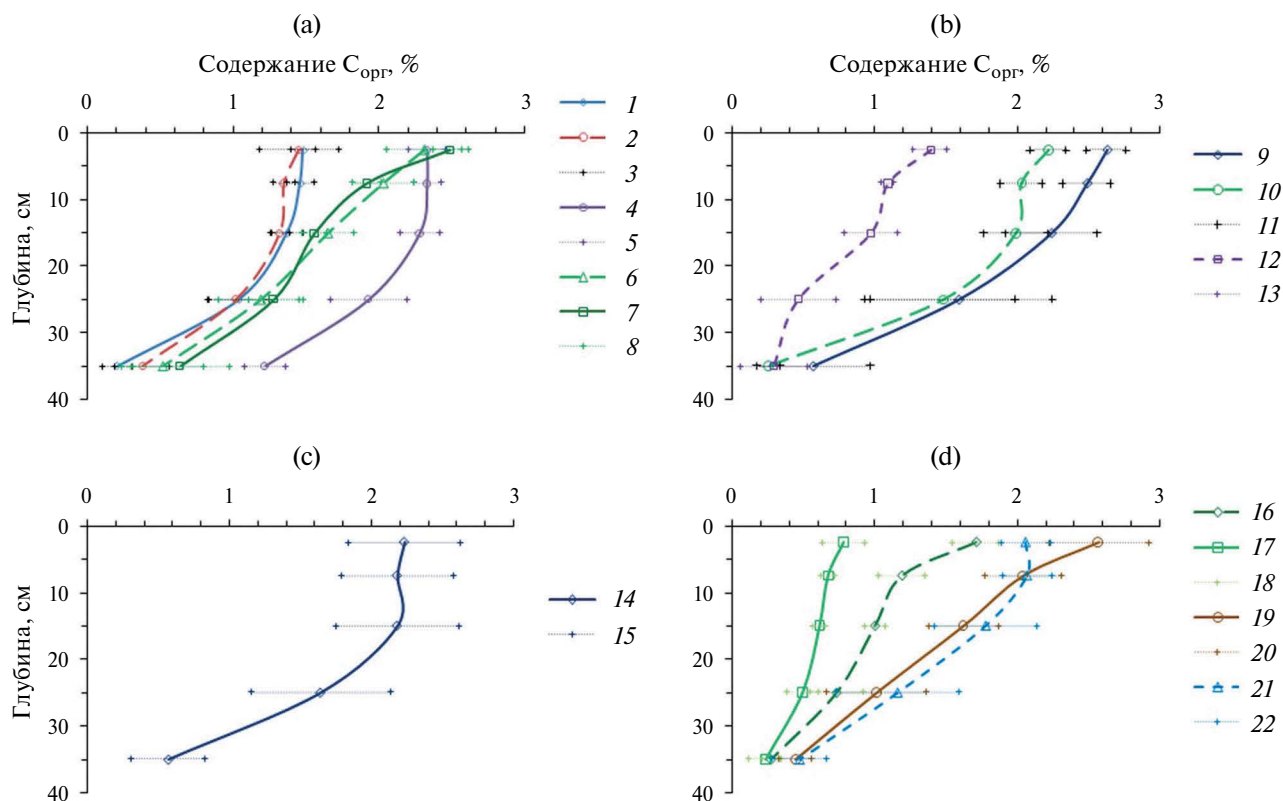


Рис. 4. Вертикальное распределение содержания $C_{орг}$ по профилю почв на динамических площадках: (а), (б), (с) – двучленные почвообразующие породы с вариацией глубины залегания верхней границы суглинистой морены в интервале 20–60 см в пределах площадки; (д) – песчаные почвообразующие породы мощностью более 1–1.5 м. Обозначения: 1 и 2 – ЕМ-28 и ЕМ-29, пашня в севообороте на ровных или слабовыпуклых участках; 4 – ЕМ-27, пашня в севообороте на слабовогнутом участке; 6 и 7 – ЕМ-24 и ЕМ-25, залежи на ровных участках; 9 и 10 – ЕМ-21 и ЕМ-22, сеяные многолетние травы 6-го года вегетации на ровном участке; 12 – ЕМ-35, сеяные многолетние травы с выпасом коров более 10 лет, ровный участок; 14 – ЕМ-23, пашня 1-го года после многолетних трав, ровный участок; 16 и 17 – ЕМ-26 и ЕМ-31, залежи, ровные участки; 19 – ЕМ-32, сенокос более 20 лет, ровный участок; 21 – ЕМ-30, пашня в севообороте на склоне; 3, 5, 8, 11, 13, 15, 18, 20, 22 – доверительные интервалы среднего арифметического для соответствующих площадок.

содержание $C_{орг}$ на двух разных глубинах отбора образцов в отдельных точках в пределах динамической площадки:

$$D_{ijk} = C_{ik} - C_{jk},$$

$$MD_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n D_{ijk}}{n},$$

где D_{ijk} – разность содержания $C_{орг}$ между i -м и j -м слоями в k -й точке опробования, абс. %; C_{ik} и C_{jk} – содержание $C_{орг}$ в i -м и j -м слоях в k -й точке соответственно, абс. %; MD_{ij} – средняя разность содержания $C_{орг}$ между i -м и j -м слоями на динамической площадке, абс. %; n – объем выборки (число пар в сопряженных рядах).

Величины средней разности содержания $C_{орг}$ между соседними слоями до глубины 20 см на динамических площадках почв пашни в севообороте

незначимо отличаются от нуля, изменяясь от -0.01 до $+0.09$ абс. %. Иными словами, индивидуальные разности содержания $C_{орг}$ по вертикальному профилю в соседних образцах в каждой точке могут принимать как положительные, так и отрицательные значения; минимум на разных площадках изменялся от -0.24 до -0.07 , максимум – от 0.11 до 0.24% (табл. 3).

Обратим внимание на площадку ЕМ-23, заложенную на пашне первого года после поднятия пласта многолетних трав (рис. 4с). Здесь за один год было получено равномерное распределение содержания $C_{орг}$ в слое от поверхности до глубины 20 см на фоне самой высокой пространственной вариабельности этого показателя в пахотном горизонте. Попарное сравнение дисперсий содержания $C_{орг}$ в пахотном горизонте по критерию Фишера на динамических площадках, заложенных на пашне, показало значимое различие в 1.5–3.5 раза,

Таблица 3. Характеристики статистического распределения разности содержания $C_{\text{орг}}$ между i -м и j -м слоями в k -й точке (D_{ijk}) опробования на разных динамических площадках и оценка значимости средней их величины (MD_{ij})

Площадка	Статистический показатель	Сравниваемые слои почвы, см					
		0–5 и 5–10	0–5 и 10–20	0–5 и 20–30	5–10 и 10–20	10–20 и 20–30	20–30 и 30–40
Почвы на пашне в севобороте							
ЕМ-27	n	9	9	9	9	9	9
	$\min D_{ijk} C_{\text{орг}}, \%$	–0.15	–0.15	–0.15	–0.08	0.06	0.43
	$\max D_{ijk} C_{\text{орг}}, \%$	0.15	0.15	0.23	0.21	1.01	1.5
	$MD_{ij} C_{\text{орг}}, \%$	0	0	0.08	0.08	0.52	1.06
	$SD D_{ij} C_{\text{орг}}, \%$	0.108	0.108	0.113	0.098	0.389	0.39
	W_{fact}	0.957	0.957	0.948	0.947	0.84	0.9
	$W_{0.05, n}$	0.829	0.829	0.829	0.829	0.829	0.829
	Распределение	Нормальное	Нормальное	Нормальное	Нормальное	Нормальное	Нормальное
	t_{fact}	0	0	2.12	2.45	4.01	8.15
	$t_{0.95, 8}$	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31
ЕМ-28	Оценка MD_{ij}	Не значима	Не значима	Не значима	Значима	Значима	Значима
	n	9	9	9	9	9	9
	$\min D_{ijk} C_{\text{орг}}, \%$	–0.1	–0.1	–0.02	–0.06	–0.02	0.3
	$\max D_{ijk} C_{\text{орг}}, \%$	0.15	0.15	0.28	0.24	0.74	1.25
	$MD_{ij} C_{\text{орг}}, \%$	0.02	0.02	0.11	0.09	0.33	0.82
	$SD D_{ij} C_{\text{орг}}, \%$	0.079	0.079	0.11	0.088	0.267	0.308
	W_{fact}	0.995	0.995	0.912	0.925	0.909	0.971
	$W_{0.05, n}$	0.829	0.829	0.829	0.829	0.829	0.829
	Распределение	Нормальное	Нормальное	Нормальное	Нормальное	Нормальное	Нормальное
	t_{fact}	0.76	0.76	3	3.07	3.71	7.99
ЕМ-29	$t_{0.95, 8}$	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31
	Оценка MD_{ij}	Не значима	Не значима	Значима	Значима	Значима	Значима
	n	8	8	8	9	9	9
	$\min D_{ijk} C_{\text{орг}}, \%$	–0.07	–0.07	–0.12	–0.12	–0.08	0.3
	$\max D_{ijk} C_{\text{орг}}, \%$	0.72	0.72	0.92	0.21	0.81	0.92
	$MD_{ij} C_{\text{орг}}, \%$	0.09	0.09	0.13	0.03	0.3	0.65
	$SD D_{ij} C_{\text{орг}}, \%$	0.257	0.257	0.343	0.107	0.268	0.225
	W_{fact}	0.612	0.612	0.711	0.953	0.951	0.918
	$W_{0.05, n}$	0.818	0.818	0.818	0.829	0.829	0.829
	Распределение	Другое	Другое	Другое	Нормальное	Нормальное	Нормальное
t_{fact}	0.99	0.99	1.07	0.84	3.36	8.67	
ЕМ-29	$t_{0.95, 8}$	2.36	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31
	Оценка MD_{ij}	Не значима	Не значима	Не значима	Не значима	Значима	Значима

Продолжение табл. 3

Площадка	Статистический показатель	Сравниваемые слои почвы, см					
		0–5 и 5–10	0–5 и 10–20	0–5 и 20–30	5–10 и 10–20	10–20 и 20–30	20–30 и 30–40
ЕМ-30	n	9	9	9	9	9	9
	$\min D_{ijk} C_{орг}, \%$	–0.16	–0.16	–0.1	–0.07	0.33	0.12
	$\max D_{ijk} C_{орг}, \%$	0.11	0.11	0.99	1.1	1.09	1.36
	$MD_{ij} C_{орг}, \%$	–0.01	–0.01	0.28	0.29	0.62	0.69
	$SD D_{ij} C_{орг}, \%$	0.092	0.092	0.352	0.362	0.279	0.471
	W_{fact}	0.958	0.958	0.892	0.857	0.896	0.909
	$W_{0.05, n}$	0.829	0.829	0.829	0.829	0.829	0.829
	Распределение	Нормальное	Нормальное	Нормальное	Нормальное	Нормальное	Нормальное
	t_{fact}	–0.33	–0.33	2.39	2.4	6.67	4.39
	$t_{0.95, 8}$	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31
	Оценка MD_{ij}	Не значима	Не значима	Значима	Значима	Значима	Значима
ЕМ-23	n	9	9	9	9	9	9
	$\min D_{ijk} C_{орг}, \%$	–0.17	–0.17	–0.19	–0.24	–0.04	0.22
	$\max D_{ijk} C_{орг}, \%$	0.22	0.22	0.26	0.18	2.64	2.3
	$MD_{ij} C_{орг}, \%$	0.05	0.05	0.05	0	0.54	1.07
	$SD D_{ij} C_{орг}, \%$	0.131	0.131	0.148	0.125	0.871	0.626
	W_{fact}	0.943	0.943	0.969	0.94	0.697	0.941
	$W_{0.05, n}$	0.829	0.829	0.829	0.829	0.829	0.829
	Распределение	Нормальное	Нормальное	Нормальное	Нормальное	Другое	Нормальное
	t_{fact}	1.15	1.15	1.01	0	1.86	5.13
	$t_{0.95, 8}$	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31
	Оценка MD_{ij}	Не значима	Не значима	Не значима	Не значима	Не значима	Значима
Почвы под многолетними травами с продолжительностью вегетации 5 лет							
ЕМ-21	n	9	9	9	9	9	9
	$\min D_{ijk} C_{орг}, \%$	–0.13	–0.13	–0.01	–0.03	0.13	0.04
	$\max D_{ijk} C_{орг}, \%$	0.34	0.34	1.12	0.89	1.76	2.28
	$MD_{ij} C_{орг}, \%$	0.15	0.15	0.4	0.25	0.65	1.02
	$SD D_{ij} C_{орг}, \%$	0.143	0.143	0.32	0.274	0.579	0.823
	W_{fact}	0.965	0.965	0.872	0.835	0.816	0.908
	$W_{0.05, n}$	0.829	0.829	0.829	0.829	0.829	0.829
	Распределение	Нормальное	Нормальное	Нормальное	Нормальное	Другое	Нормальное
	t_{fact}	3.15	3.15	3.75	2.74	3.37	3.72
	$t_{0.95, 8}$	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31
	Оценка MD_{ij}	Значима	Значима	Значима	Значима	Значима	Значима

Продолжение табл. 3

Площадка	Статистический показатель	Сравниваемые слои почвы, см					
		0–5 и 5–10	0–5 и 10–20	0–5 и 20–30	5–10 и 10–20	10–20 и 20–30	20–30 и 30–40
ЕМ-22	n	9	9	9	9	8	8
	$\min D_{ijk} C_{\text{орг}}, \%$	–0.08	–0.08	–0.03	–0.15	0.01	0.03
	$\max D_{ijk} C_{\text{орг}}, \%$	0.34	0.34	0.58	0.66	1.68	2.26
	$MD_{ij} C_{\text{орг}}, \%$	0.19	0.19	0.23	0.04	0.56	1.56
	$SD D_{ij} C_{\text{орг}}, \%$	0.118	0.118	0.167	0.252	0.653	0.766
	W_{fact}	0.865	0.865	0.928	0.725	0.809	1.606
	$W_{0.05, n}$	0.829	0.829	0.829	0.829	0.818	0.818
	Распределение	Нормальное	Нормальное	Нормальное	Другое	Другое	Нормальное
	t_{fact}	4.83	4.83	4.13	0.48	2.43	5.76
	$t_{0.95, 8}$	2.31	2.31	2.31	2.31	2.36	2.31
Почвы под сеянными многолетними травами с выпасом коров							
ЕМ-35	n	9	9	9	9	8	8
	$\min D_{ijk} C_{\text{орг}}, \%$	0.07	0.07	0.06	–0.09	0.06	–0.03
	$\max D_{ijk} C_{\text{орг}}, \%$	0.73	0.73	1.06	0.69	0.92	0.76
	$MD_{ij} C_{\text{орг}}, \%$	0.3	0.3	0.42	0.12	0.51	0.27
	$SD D_{ij} C_{\text{орг}}, \%$	0.192	0.192	0.311	0.242	0.282	0.28
	W_{fact}	0.885	0.885	0.93	0.81	0.975	0.925
	$W_{0.05, n}$	0.829	0.829	0.829	0.829	0.818	0.818
	Распределение	Нормальное	Нормальное	Нормальное	Другое	Нормальное	Нормальное
	t_{fact}	4.69	4.69	4.05	1.49	5.12	2.73
	$t_{0.95, 8}$	2.31	2.31	2.31	2.31	2.36	2.36
Почвы под залежами							
ЕМ-24	n	8	8	8	9	9	9
	$\min D_{ijk} C_{\text{орг}}, \%$	–0.28	–0.28	0.28	0.18	0.15	0.16
	$\max D_{ijk} C_{\text{орг}}, \%$	0.67	0.67	1	0.66	0.99	1.11
	$MD_{ij} C_{\text{орг}}, \%$	0.27	0.27	0.64	0.38	0.46	0.67
	$SD D_{ij} C_{\text{орг}}, \%$	0.315	0.315	0.278	0.154	0.279	0.367
	W_{fact}	0.957	0.957	0.918	0.961	0.91	0.878
	$W_{0.05, n}$	0.818	0.818	0.818	0.829	0.829	0.829
	Распределение	Нормальное	Нормальное	Нормальное	Нормальное	Нормальное	Нормальное
	t_{fact}	2.42	2.42	6.51	7.4	4.95	5.48
	$t_{0.95, 8}$	2.31	2.31	2.31	2.31	2.36	2.31
Оценка MD_{ij}							
		Значима	Значима	Значима	Значима	Значима	Значима

Продолжение табл. 3

Площадка	Статистический показатель	Сравниваемые слои почвы, см					
		0–5 и 5–10	0–5 и 10–20	0–5 и 20–30	5–10 и 10–20	10–20 и 20–30	20–30 и 30–40
ЕМ-25	n	9	9	9	9	9	9
	$\min D_{ijk} C_{opr}, \%$	0.33	0.33	0.57	0.23	0.04	0.09
	$\max D_{ijk} C_{opr}, \%$	0.83	0.83	1.11	0.5	0.56	1.02
	$MD_{ij} C_{opr}, \%$	0.56	0.56	0.92	0.36	0.28	0.64
	$SD D_{ij} C_{opr}, \%$	0.188	0.188	0.197	0.11	0.177	0.343
	W_{fact}	0.93	0.93	0.811	0.862	0.947	0.897
	$W_{0.05, n}$	0.829	0.829	0.829	0.829	0.829	0.829
	Распределение	Нормальное	Нормальное	Другое	Нормальное	Нормальное	Нормальное
	t_{fact}	8.94	8.94	14.01	9.82	4.75	5.6
	$t_{0.95, 8}$	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31
	Оценка MD_{ij}	Значима	Значима	Значима	Значима	Значима	Значима
ЕМ-26	n	8	8	9	8	9	9
	$\min D_{ijk} C_{opr}, \%$	0.24	0.24	0.3	–0.13	0.01	0.13
	$\max D_{ijk} C_{opr}, \%$	0.78	0.78	0.87	0.43	0.61	0.8
	$MD_{ij} C_{opr}, \%$	0.51	0.51	0.71	0.18	0.27	0.45
	$SD D_{ij} C_{opr}, \%$	0.159	0.159	0.182	0.18	0.207	0.203
	W_{fact}	0.969	0.969	0.819	0.975	0.897	0.907
	$W_{0.05, n}$	0.818	0.818	0.829	0.818	0.829	0.829
	Распределение	Нормальное	Нормальное	Другое	Нормальное	Нормальное	Нормальное
	t_{fact}	9.07	9.07	11.7	2.83	3.91	6.65
	$t_{0.95, 8}$	2.36	2.31	2.31	2.36	2.31	2.31
	Оценка MD_{ij}	Значима	Значима	Значима	Значима	Значима	Значима
ЕМ-31	n	9	9	9	9	9	9
	$\min D_{ijk} C_{opr}, \%$	–0.04	–0.04	–0.01	–0.04	0.02	0.02
	$\max D_{ijk} C_{opr}, \%$	0.68	0.68	0.72	0.18	0.36	0.49
	$MD_{ij} C_{opr}, \%$	0.12	0.12	0.17	0.05	0.13	0.26
	$SD D_{ij} C_{opr}, \%$	0.217	0.217	0.214	0.072	0.131	0.166
	W_{fact}	0.622	0.622	0.671	0.959	0.737	0.942
	$W_{0.05, n}$	0.829	0.829	0.829	0.829	0.829	0.829
	Распределение	Другое	Другое	Другое	Нормальное	Другое	Нормальное
	t_{fact}	1.66	1.66	2.38	2.08	2.98	4.7
	$t_{0.95, 8}$	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31
	Оценка MD_{ij}	Не значима	Не значима	Значима	Не значима	Значима	значима

Площадка	Статистический показатель	Сравниваемые слои почвы, см					
		0–5 и 5–10	0–5 и 10–20	0–5 и 20–30	5–10 и 10–20	10–20 и 20–30	20–30 и 30–40
Почвы под сенокосом							
ЕМ-32	n	9	9	9	9	9	9
	$\min D_{ijk} C_{\text{орг}}, \%$	0.02	0.02	0.33	0.16	0.02	0.07
	$\max D_{ijk} C_{\text{орг}}, \%$	0.89	0.89	1.33	0.76	1.48	1.36
	$MD_{ij} C_{\text{орг}}, \%$	0.53	0.53	0.95	0.42	0.61	0.57
	$SD D_{ij} C_{\text{орг}}, \%$	0.276	0.276	0.322	0.188	0.43	0.376
	W_{fact}	0.965	0.965	0.928	0.958	0.952	0.928
	$W_{0.05, n}$	0.829	0.829	0.829	0.829	0.829	0.829
	Распределение	Нормальное	Нормальное	Нормальное	Нормальное	Нормальное	Нормальное
	t_{fact}	5.76	5.76	8.85	6.7	4.26	4.55
	$t_{0.95, 8}$	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31
	Оценка MD_{ij}	Значима	Значима	Значима	Значима	Значима	Значима

а именно, 0.52–0.58 абс. % на ЕМ-23 против 0.09–0.33 абс. % на других площадках.

Посев на пашне многолетних кормовых трав, вегетирующих 5 лет [18, 19], привел к формированию дернины мощностью 5–10 см. Прямое сравнение среднего содержания $C_{орг}$ в соседних слоях на площадке ЕМ-21 демонстрирует незначимое его отличие последовательно по всему профилю за счет высокого пространственного варьирования (рис. 4б, линия 9). На площадке ЕМ-22 в слое 0–5 см отмечено значимо более высокое на 0.19% содержание $C_{орг}$ по сравнению со слоем 5–10 см (рис. 4б, линия 10). Ниже средние значения $C_{орг}$ в последовательных парах слоев не имеют значимых различий также за счет высокого пространственного варьирования. Оценка средней разности содержания $C_{орг}$ в сопряженных рядах двух слоев по отдельным точкам для обеих площадок является значимой по всему профилю при возможности аппроксимации данных нормальным законом распределения по критерию Уилка–Шапиро (табл. 3). Это означает, что под многолетними травами в течение 5 лет сформировался аккумулятивный вертикальный профиль органического углерода с максимумом возле поверхности на фоне высокого пространственного варьирования его характеристик на малых расстояниях.

На динамической площадке ЕМ-35, которая характеризует почвенную мозаику на бывшей пашне с посевом многолетних трав и последующим выпасом коров более 5 лет, также отмечается наличие дернины и аккумулятивный вертикальный

профиль органического углерода с максимумом возле поверхности на фоне низкого содержания $C_{орг}$ (рис. 4б, линия 12).

Почвы под залежами (рис. 4а, линии 6 и 7; рис. 4д, линии 16 и 17) и под сенокосом (рис. 4д, линия 19) все имеют аккумулятивный вертикальный профиль содержания $C_{орг}$ с максимумом возле поверхности, отличаясь друг от друга величиной этого максимума. На большинстве отмеченных динамических площадок сформировалась дернина. Исключением является площадка ЕМ-31 с агроземом песчаным на песках в южной части тестового полигона. В почвах на этой площадке самое низкое содержание $C_{орг}$ и корневища сорной растительности не смогли сформировать дернину и дифференцировать верхнюю часть бывшего пахотного горизонта до глубины 10 см.

Пространственное варьирование запасов $C_{орг}$ в тонких слоях почв. Среднеквадратическое отклонение запасов $C_{орг}$, рассчитанных для отдельных слоев толщиной 5 или 10 см в пределах каждой динамической площадки, изменяется преимущественно в диапазоне от 1 до 10 т/га независимо от величины запаса $C_{орг}$ в слое и глубины его залегания (рис. 3е). Имеет значение мощность слоя. Для пятисантиметровых слоев среднеквадратическое отклонение не превышает 4 т/га, в слоях 10–20, 20–30 и 30–40 см отмечается весь диапазон. Это свидетельствует о значительном пространственном варьировании запасов $C_{орг}$ в абсолютном выражении. Напротив, коэффициент вариации имеет очень слабую тенденцию ($R^2 = 0.1$) увеличения значений при

расширении диапазона его изменения по мере уменьшения величины запаса, связанного с углублением слоя (рис. 3г).

Расчет запасов $C_{орг}$ в обобщенных слоях увеличивающейся мощности демонстрирует иную картину. Среднеквадратическое отклонение запасов $C_{орг}$ (Y) в обобщенных слоях увеличивается при увеличении значений самого запаса $C_{орг}$ (X). Зависимость аппроксимирована квадратичным полиномом $Y = 0.1075 X + 0.0087 X^2$ с числом степеней свободы 50, $R^2 = 0.909$, коэффициенты регрессии значимы при $P = 0.95$ (рис. 3ф). При этом коэффициент вариации не зависит от величины запаса $C_{орг}$ в обобщенном слое, изменяясь в диапазон от 5 до 26%, в среднем 15% (рис. 3h). В результате для изученных динамических площадок пространственное варьирование запасов $C_{орг}$ в слое 0–30 см, который принят в протоколе ФАО [41], в агродерново-подзолах песчаных составляет от 3 до 15 т/га (в среднем около 8 т/га) и в агродерново-подзолистых супесчано-суглинистых почвах — от 5 до 19 т/га (в среднем около 11 т/га). Величины настолько велики, что оценить изменение запасов $C_{орг}$ во времени для слоя 0–30 см в целом практически не представляется возможным. Ожидать столь большие изменения потенциально допустимо лишь через 20–40 лет. Вместе с тем дифференцированный подход отбора образцов тонкими слоями в пределах слоя 0–30 см [35] позволяет, во-первых, иметь приемлемые значения характеристик пространственного варьирования содержания и запасов $C_{орг}$ в поверхностных слоях почв, на основе которых могут быть получены значимые изменения содержания и запасов $C_{орг}$ через 5–10 лет, если таковые изменения потенциально возможны, и, во-вторых, получать информацию о вертикальном распределении $C_{орг}$ в пределах настоящего или бывшего пахотного горизонта, которая может быть использована для предварительной оценки баланса $C_{орг}$ в почве по измерениям даже в один срок наблюдений.

Запасы $C_{орг}$ в тонких слоях почв (рис. 5, табл. S8). В слоях 0–5 и 5–10 см, которые являются самыми тонкими и находятся ближе всего к дневной поверхности почвы, диапазон изменения запасов $C_{орг}$ составляет от 4.0 до 19.5 т/га, чаще от 8.8 до 15.7 т/га. Если их объединить в слой 0–10 см, диапазон изменения становится шире — от 8.5 до 34.6 т/га, чаще от 15.0 до 31.1 т/га.

В следующих слоях 10–20, 20–30 и 30–40 см крайние значения диапазонов изменения запасов $C_{орг}$ постепенно уменьшаются, становясь минимальными в наиболее глубоком слое 30–40 см, представленном преимущественно минеральными горизонтами E, EL, BF, BEL или BT (рис. 5, табл. S8).

Рассматривая вертикальное распределение запасов $C_{орг}$ по десятисантиметровым слоям, в

почвах большинства динамических площадок (12 из 13) запасы $C_{орг}$ верхних двух слоев 0–10 и 10–20 см статистически не различаются. Исключением является площадка ЕМ-25 на залежи, в почвах которой запас $C_{орг}$ в поверхностном слое 0–10 см больше, чем в слое 10–20 см. Это означает, что только на залежи ЕМ-25 можно констатировать увеличение запаса $C_{орг}$ в поверхностном слое. Для пашни в севообороте отсутствие разницы в запасах $C_{орг}$ верхней и нижней частей ежегодно обрабатываемого пахотного слоя — это закономерный результат перемешивания. Для других угодий с постоянным растительным покровом в течение 5 лет и более одинаковый запас $C_{орг}$ верхней и нижней частей бывшего пахотного слоя является следствием взаимно компенсирующих двух процессов: (1) увеличения содержания $C_{орг}$ и (2) уменьшения плотности поверхностной части горизонта.

Запасы $C_{орг}$ в обобщенных слоях на каждой динамической площадке увеличиваются по мере увеличения мощности слоя (рис. 6, табл. S9). В слое 0–30 см средние величины запасов $C_{орг}$ в исследованных почвах составляют от 23.1 до 84.7 т/га, чаще в интервале от 50 до 80 т/га. Весь гумусовый профиль в исследованных почвах ограничен глубиной 35–40 см, в связи с этим целесообразно отметить, что средние значения полных запасов $C_{орг}$ в слое 0–40 см на отдельных динамических площадках равны 27–98 т/га, чаще 55–95 т/га.

Сравнение содержания и запасов $C_{орг}$ в почвах разных угодий. Задача наземного мониторинга содержания и запасов $C_{орг}$ в почвах сельскохозяйственных угодий заключается в оценке изменения этих показателей на основе прямого измерения показателей в отобранных образцах почв. Выше были представлены оценки указанных показателей, которые принимаются как начальный базовый уровень ведения мониторинга. Последующие измерения на тех же динамических площадках предполагаются через 5–10 лет. Вместе с тем для оценки возможной минимальной разницы при последующем сравнении показателей одной и той же динамической площадки в два разных срока наблюдений на данном этапе важно оценить реальные минимальные значимые разницы содержания и запасов $C_{орг}$ и плотности почв на основе сравнения разных динамических площадок между собой. Такое сравнение дополнительно дает предварительную информацию о влиянии вида и режима использования угодий на рассматриваемые показатели почв. Формально попарное сравнение было сделано для всех площадок. Для получения более обоснованных оценок влияния вида и режима использования угодий ниже представлено сравнение пар или нескольких площадок, учитывая однотипность почвенных комбинаций, почвообразующих пород и положения в рельефе.

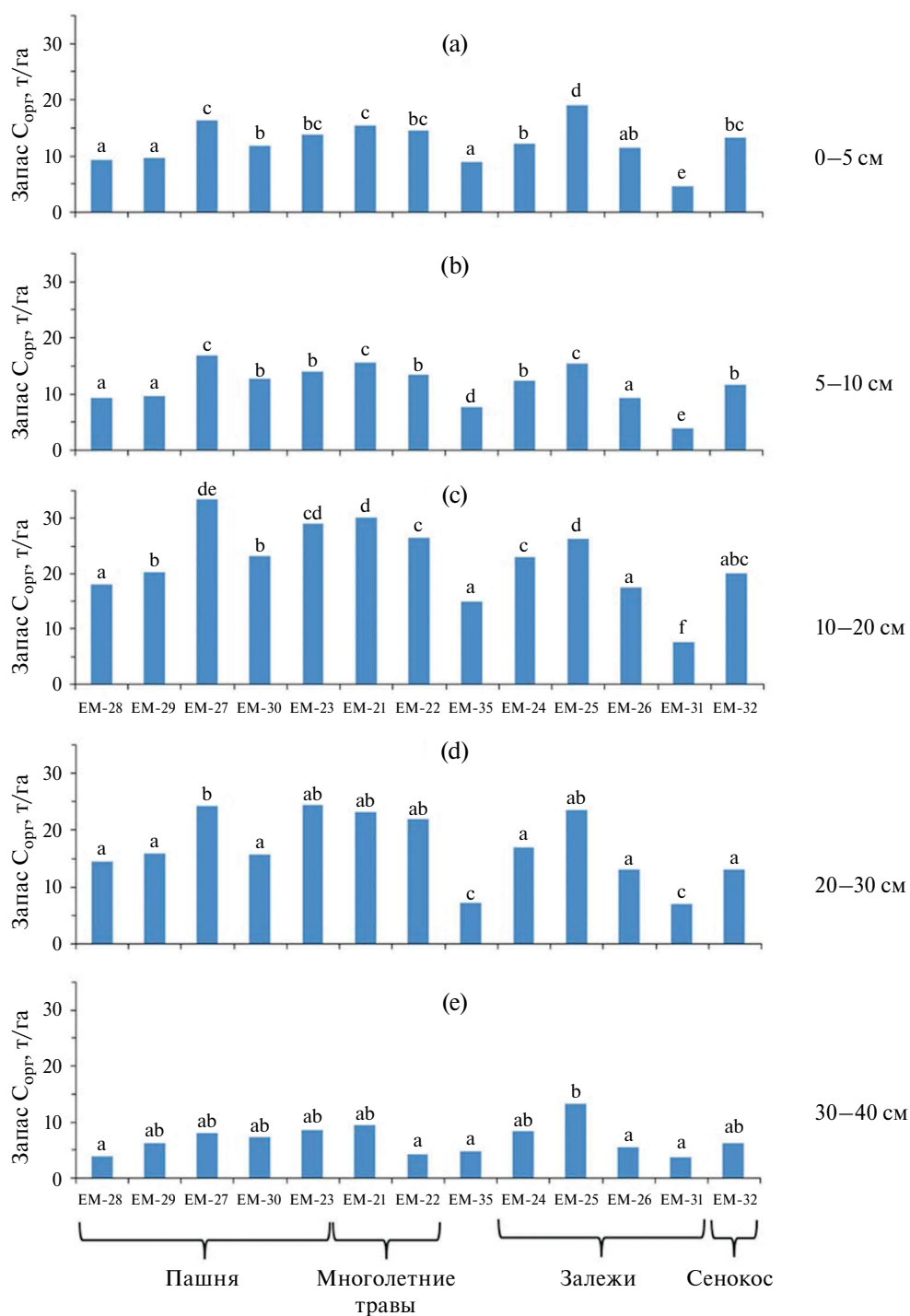


Рис. 5. Сравнение запасов $C_{орг}$ в отдельных слоях почв 13 динамических площадок. Слой: (а) – 0–5 см, (б) – 5–10 см, (с) – 10–20 см, (д) – 20–30 см, (е) – 30–40 см. Одинаковые буквы над столбиками в пределах одного слоя почвы означают отсутствие значимых отличий средних значений (при $n = 9$ или 8) между площадками, разные буквы – значимые различия при доверительной вероятности 0.95.

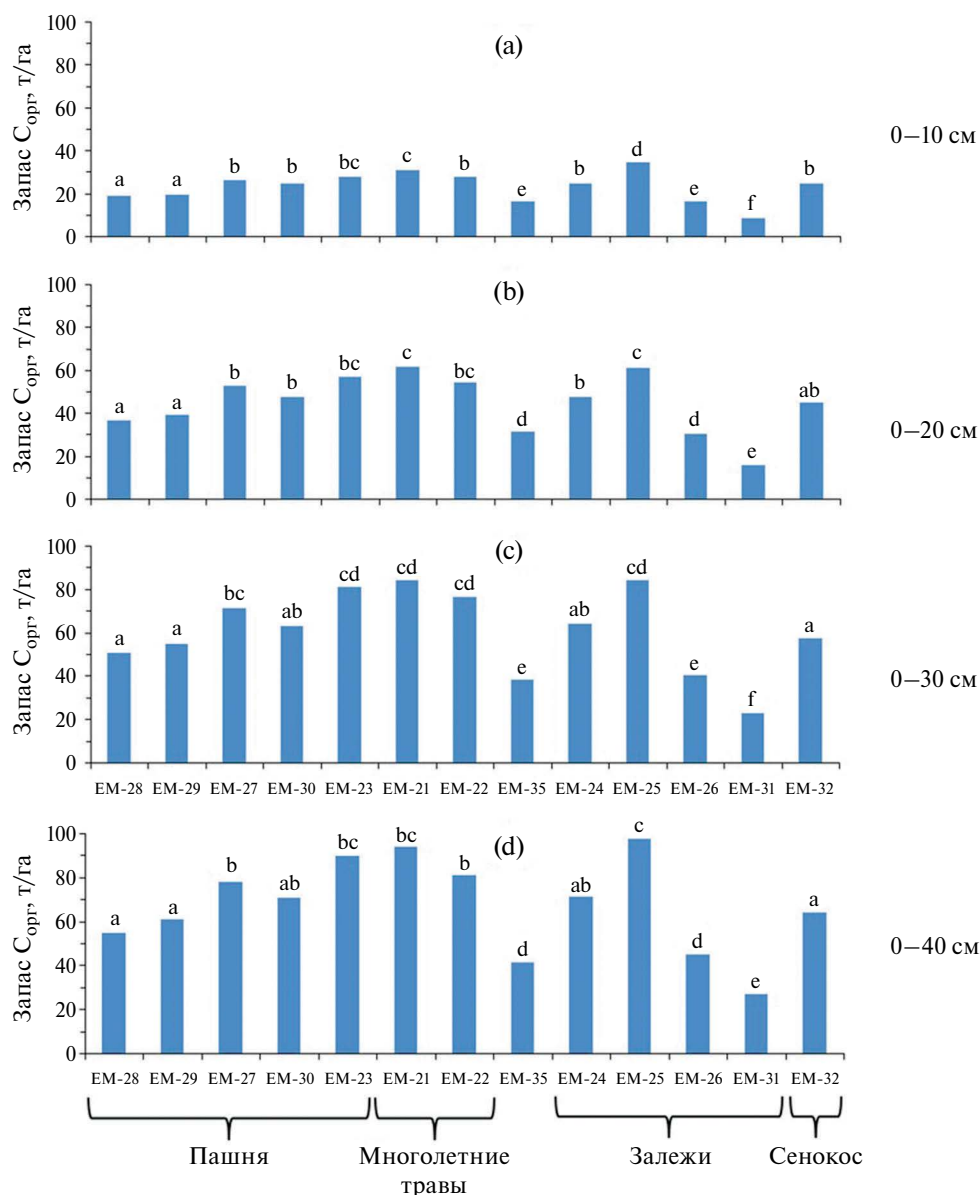


Рис. 6. Сравнение запасов $C_{\text{орг}}$ в обобщенных слоях почв 13 динамических площадок. Слои: (a) – 0–10 см, (b) – 0–20 см, (c) – 0–30 см, (d) – 0–40 см. Одинаковые буквы над столбиками в пределах одного слоя почвы означают отсутствие значимых отличий средних значений (при $n = 9$ или 8) между площадками, разные буквы – значимые различия при доверительной вероятности 0.95.

Две площадки (ЕМ-28 и ЕМ-29) на сравнительно ровных или слабовыпуклых поверхностях на пашне в севообороте, представленных мозаикой агродерново-подзолистых супесчано-суглинистых почв на морене и агродерново-подзолов супесчано-песчаных на двучленных отложениях (песок, подстилаемый с 50–60 см суглинистой мореной), не имеют значимых различий друг от друга по большинству показателей содержания и запасов $C_{\text{орг}}$ (рис. 4а линии 1 и 2, рис. 5, 6), исключая запас $C_{\text{орг}}$ в слое 10–20 см за счет различия плотности почвы.

Динамическая площадка ЕМ-27 заложена на такой же мозаике почв на пашне на вогнутой позиции рельефа (широкая ложбина). Ее сравнение с предыдущими двумя (ЕМ-28 и ЕМ-29) показало значимое большее значение большинства показателей содержания и запасов $C_{\text{орг}}$ на этой площадке (рис. 4а линии 1, 2, 4), исключая запас $C_{\text{орг}}$ в самом нижнем тонком слое 30–40 см, который обычно представлен минеральными горизонтами EL, E, BEL, BT, BF, почти не содержащими $C_{\text{орг}}$ с неравномерным внедрением сверху гумусированного

антропогенно преобразованного мелиорированного горизонта.

Еще одна площадка на пашне в севообороте (ЕМ-30) характеризует агродерново-подзолы иллювиально-железистые супесчано-песчаные на песках мощностью более 1–1.5 м, расположенные на склоне южной экспозиции. При формальном сравнении в песчаных почвах ЕМ-30 значительно большее содержание и запасов $C_{орг}$ в пахотном горизонте до глубины 20 см по сравнению с мозаикой супесчано-суглинистых почв на морене и двучленах (площадки ЕМ-28 и ЕМ-29), но меньше, чем на площадке ЕМ-27, находящейся в широкой ложбине (рис. 4 линии 1, 2, 2I). Одной из причин повышенного содержания $C_{орг}$ в пахотном горизонте на площадке ЕМ-30 является присутствие мелких угольков сгоревших растительных остатков. На этом фоне запасы $C_{орг}$ в слоях 0–30 и 0–40 см между тремя площадками ЕМ-28, ЕМ-29 и ЕМ-30, и отдельно между площадками ЕМ-27 и ЕМ-30 статистически не различаются за счет высокого пространственного варьирования в пределах отдельных площадок. Как отмечалось выше, запасы $C_{орг}$ в слоях 0–30 и 0–40 см на площадке ЕМ-27 значительно выше, чем на площадках ЕМ-28 и ЕМ-29 (рис. 6с, 6d).

Участки с целенаправленным посевом кормовых многолетних трав и их бессменной вегетацией в течение 5 лет представлены площадками ЕМ-21 и ЕМ-22. Они различаются по составу травосмесей, располагаясь на выровненных поверхностях склона северной экспозиции с мозаикой почв, аналогичной площадкам ЕМ-28 и ЕМ-29. Значимые различия имеются в поверхностных слоях до глубины 10 см и по содержанию, и по запасам $C_{орг}$: более высокие значения на площадке ЕМ-21 по сравнению с ЕМ-22. Глубже различия незначимы (рис. 4b линии 9, 10).

Особый интерес представляет площадка ЕМ-23, заложенная на пашне первого года после вегетации многолетних трав (рис. 4с линии 14, 15). По рельефу, почвообразующим породам и почвенной комбинации площадка сопоставима с ЕМ-28, ЕМ-29 на пашне и ЕМ-21, ЕМ-22 под многолетними травами шестого года вегетации. Площадка ЕМ-23 по большинству показателей запасов $C_{орг}$ статистически не отличается от площадок ЕМ-21 и ЕМ-22 под многолетними травами за счет очень высокого пространственного варьирования в пределах площадки ЕМ-23, но по этой же причине в пределах пахотного горизонта после вспашки пласта многолетних трав получено равномерное вертикальное распределение содержания $C_{орг}$.

Обратим внимание, что под многолетними травами запасы $C_{орг}$ в почвах на сравнительно ровных участках (ЕМ-21, ЕМ-22) оказались сопоставимы с

запасами $C_{орг}$ или значительно больше, чем в похожих почвах в широкой ложбине (ЕМ-27).

На залежах длительностью более 30 лет на ровных участках с мозаикой агродерново-подзолистых почв на морене и агродерново-подзолов на двучленах при близком залегании морены (площадки ЕМ-24, ЕМ-25) в почвах образовалась дернина мощностью 5–10 см, сформировался аккумулятивный вертикальный профиль содержания $C_{орг}$ с максимумом возле поверхности, статистически не отличающийся на двух площадках (рис. 4а линии 6 и 7). Вместе с тем вертикальное распределение плотности почв в поверхностных горизонтах статистически различается, что привело к значимому отличию запасов $C_{орг}$ в тонких слоях до глубины 30 см (рис. 5) и во всех обобщенных слоях вплоть до 0–40 см (рис. 6): на площадке ЕМ-25 больше, чем на ЕМ-24.

Еще две динамические площадки характеризовали залежи с песчаными почвами на песках мощностью более 1 м: ЕМ-26 — залежь более 30 лет с агродерново-подзолами иллювиально-железистыми постагрогенными супесчано-песчаными, ЕМ-31 — залежь 10 лет с агроземами постагрогенными песчаными. Обе площадки значительно отличаются друг от друга и от залежей на морене (ЕМ-24, ЕМ-25) по большинству показателей, исключая содержание и запасы $C_{орг}$ в слое 30–40 см (рис. 4d линии 16 и 17). Наименьшие запасы $C_{орг}$ оказались в агроземе постагрогенном песчаном (ЕМ-31), в котором за 10 лет не успела сформироваться дернина. Залежи на песчаных почвах отличаются значительно меньшими значениями содержания и запасов $C_{орг}$ по сравнению с залежами на супесчано-суглинистых почвах при близком залегании морены.

В агродерново-подзолах иллювиально-железистых постагрогенных песчаных под сенокосом, используемым более 30 лет (динамическая площадка ЕМ-32), отмечаются хорошо выраженное аккумулятивное вертикальное распределение содержания $C_{орг}$ с максимумом возле поверхности (рис. 4d линия 19), дернина мощностью до 10 см и запасы $C_{орг}$ сопоставимые с запасами в почвах на морене (рис. 5, 6). При сравнении площадок с почвами на песках под сенокосом получены наибольшие запасы $C_{орг}$.

ОБСУЖДЕНИЕ

При обсуждении полученных в настоящем исследовании значений содержания и запасов $C_{орг}$ в почвах сельскохозяйственных угодий с таковыми в аналогичных почвах таежной зоны приходится учитывать целый ряд параметров, которые заметно отличаются у разных авторов. К таким параметрам относятся: (1) мощность слоя, для которого разные авторы представляли данные; (2) глубина отбора образцов; (3) способ определения содержания

$C_{\text{орг}}$ в почве (метод Тюрина или сухое сжигание); (4) единицы измерения запасов $C_{\text{орг}}$ (кг/м² или т/га). Поскольку в настоящем исследовании отбор образцов проводили дифференцированно по глубине тонкими слоями и выполнены расчеты для разных глубин и мощностей слоев почвы, при сравнении с литературными данными использовали показатели с сопоставимыми параметрами.

Существующие оценки свидетельствуют о низком содержании и запасах $C_{\text{орг}}$ в пахотных почвах Нечерноземной зоны европейской территории России — от 10 до 50 т/га [32]. Региональные исследования, посвященные анализу содержания и запасов $C_{\text{орг}}$ в почвах сельскохозяйственных угодий Нечерноземья, часто содержат противоречивые данные о направлении изменения запасов $C_{\text{орг}}$ в зависимости от истории землепользования, биоклиматических и литологических факторов.

Значительная площадь угодий в Нечерноземье занята залежами, т.е. землями, выведенными из сельскохозяйственного оборота. В актуальном состоянии эти земли покрыты луговой или древесно-кустарниковой растительностью в зависимости от длительности прекращения использования. По данным разных авторов, в дерново-подзолистых почвах залежей в пределах слоя 0–30 см отмечали следующие варианты перераспределения и направления изменения запасов углерода.

1. В процессе забрасывания пашни и формирования залежи в первые 10 лет в слое 0–10 см происходит достоверный прирост запасов $C_{\text{орг}}$ благодаря накоплению травянистого опада в подстилке [2, 30, 33, 34]. Слой 10–20 см, генетически принадлежащий старопашотному горизонту, отличается слабовыраженным накоплением углерода на ранних стадиях залежи, а после формирования старовозрастного древостоя запас углерода остается на одинаковом уровне [13, 33].

В агродерново-подзолистых глееватых суглинистых почвах на покровных суглинках в Пошехонском районе Ярославской области на 10 площадках 20 × 20 м с 9-кратным опробованием на каждой для слоя 0–20 см в условиях залежи длительностью от 10 до 30 лет получен диапазон значений запасов $C_{\text{орг}}$ от 29 до 50 т/га при коэффициенте вариации от 10 до 20% [31]. В этой же публикации отмечаются более низкие запасы $C_{\text{орг}}$ в почвах пашни по сравнению с залежью [31]. В исследованных почвах на морене в Тверской области (ЕМ-24, ЕМ-25) наблюдался близкий диапазон значений от 36 до 65 т/га при коэффициенте вариации от 8 до 13% с аналогичной тенденцией более высоких запасов в 30-летних залежах по сравнению с пашней.

Для агродерново-подзолистых почв на покровных суглинках Костромской области также отмечено увеличение запасов $C_{\text{орг}}$ в слое 0–20 см под лугом и лесом разного возраста по сравнению с

пашней, но на более низком общем уровне величин 14–26 т/га (метод Тюрина, в условном пересчете на метод сухого сжигания 16–29 т/га) [29]. Такая тенденция установлена и в хроноряду пашня — залежи, зарастающие лесом, для слоя 0–30 см агродерново-подзолов литобарьерных супесчаных на двучленных отложениях с подстиланием морены на глубине около 79 см в Костромской области; за счет большей мощности слоя запасы $C_{\text{орг}}$ выше — 26–50 т/га [33, 34].

2. В условиях Карелии авторами [6] на основе хроноряда, состоящего из агрозема текстурно-дифференцированного суглинистого с мощным пахотным горизонтом (34 см) и отсутствием горизонта ВЕЛ на пашне в севообороте и агродерново-подзолистых постагрогенных суглинистых почв с профилем Р–ВЕЛ–ВТ–ВС на залежах, заросших лесом с большой долей хвойных деревьев возрастом 20 и 65 лет, сделали вывод о значимом уменьшении запасов $C_{\text{орг}}$ слое 0–100 см со 138 т/га на пашне до 101–91 т/га по мере увеличения возраста залежи. Такое изменение запасов $C_{\text{орг}}$ обусловлено существенным уменьшением плотности верхних горизонтов с 1.5 г/см³ на пашне до 1.1–0.9 г/см³ на залежах под лесом на фоне увеличения содержания $C_{\text{орг}}$ в верхнем горизонте с 1.6% на пашне до 4.6% в 65-летней залежи. Это сопровождалось увеличением надземной и подземной фитомассы на залежах. О похожей тенденции уменьшения запасов $C_{\text{орг}}$ в слое 0–20 см дерново-подзолистых суглинистых почвах залежей Новгородской области написано в работе [26], хотя на представленных графиках показан настолько большой разброс, что различия средних следует считать незначимыми. В суглинистых агродерново-подзолистых почвах под сенокосом в Костромской области в слое 0–30 см запасы составили 52 т/га (пространственное варьирование не оценивали), а после прекращения сенокосения и постепенного зарастания лесом содержание $C_{\text{орг}}$ в слоях 0–10 и 10–20 см и запасы $C_{\text{орг}}$ в слое 0–30 см снижались [33, 34].

3. На основе трех хронорядов агродерново-подзолов иллювиально-железистых супесчаных и агродерново-подзолистых суглинистых почв в таежной зоне европейской части России Люри с соавт. [17] описывают изменение запасов $C_{\text{орг}}$ в ходе постагрогенного развития почв Нечерноземья как закономерность, независимую от зонально-провинциального положения исследуемых хронорядов. На первых стадиях вывода пашни из оборота запасы $C_{\text{орг}}$ в органо-минеральных горизонтах снижаются, вначале резко (в 1.5–2 раза), далее постепенно, а на следующей стадии от 30–80 до 150–170 лет — запасы увеличиваются как в подстилке, так и в минеральных горизонтах, выходя приближенно на тот же уровень, как на пашне [17]. При этом во всех почвах залежей и коренного леса в хронорядах, исследуемых этими авторами [17] формируется

аккумулятивное вертикальное распределение $C_{орг}$ с максимумом возле поверхности почвы и происходит уменьшение плотности поверхностных горизонтов.

Возможны две причины появления в специальной литературе суждений о разных тенденциях изменения $C_{орг}$ в почвах залежей по сравнению с пашней.

Первая причина — сложность подбора адекватных членов хроноряда, отличающихся только длительностью оцениваемого воздействия при прочих равных условиях. Для рассматриваемой задачи в качестве фактора времени используется длительность нахождения почвы под залежью, а прочих условий, которые должны быть равны по некоторым параметрам, учитывая особенности каждого из этих условий, довольно много — это рельеф, почвообразующие породы, гидрологические условия, почвенная комбинация или элементарный почвенный ареал, строение почвенного профиля. Похожие позиции рельефа, почвообразующие породы и гидрологические условия авторы хронорядов обычно подбирают удовлетворительно. Строение профиля почв разных членов хроноряда чаще всего предполагают изменившимися в результате изучаемого воздействия, соблюдая принадлежность всех почв в хроноряду к одному типу или подтипу почв. Однотипный характер почвенных комбинаций на всех участках, составляющих хроноряд, как правило, вообще не оценивают.

При оценке сопоставимости строения почвенного профиля на площадках хроноряда, на наш взгляд, первым важным условием является оценка глубины нижней границы пахотного горизонта на пашне и бывшего пахотного горизонта в почвах залежей. Она должна быть близкой (вариация не более 5 см) во всех членах ряда с учетом возможного (наблюдаемого) разуплотнения поверхностных горизонтов на залежах. Если это условие не соблюдается, то при меньшей мощности бывшего пахотного горизонта в залежных почвах гарантированно с высокой вероятностью (при хорошей статистике) получим более низкие запасы $C_{орг}$ в пределах бывшего пахотного горизонта, и, наоборот, при большей мощности под залежами по сравнению с пашней. Примером может служить хроноряд в Карелии [6], в котором на пашне мощность горизонта Р равна 34 см, на залежи с 20-летним лесом она не превышает 28 см, а на залежи по 65-летним лесом нижняя граница серогумусового постагрогенного горизонта АУра меньше 20 см.

Вторым условием сравнения почв в хроноряде является похожее строение почвенного профиля по наличию основных почвенных горизонтов. Это условие контролирует первое — глубину нижней границы пахотного горизонта. В частности, в хроноряду из Карелии строение почв на залежах разного

возраста Р—BEL—BT—C и O—AY—AYpa—EL—BEL—BT—BC—C, а на пашне отсутствуют горизонты EL и BEL за счет их полного вовлечения в пахотный горизонт Р большой мощности. В результате неадекватный выбор объекта на пашне способствовал статистически значимо более высоким оценкам запасов $C_{орг}$ в почвах пашни по сравнению с залежами [6].

Другая причина получения разных выводов об изменении запасов $C_{орг}$ в почвах хронорядов — недооценка роли пространственного варьирования этих показателей. Во многих работах отсутствуют пространственные повторности на отдельных участках, которые выстроены в хроноряд [17, 33, 34], либо оценки варьирования игнорируются при интерпретации данных, делая вывод по формальному различию средних [26]. При отсутствии пространственных повторностей ($n = 1$) для оценки различий между почвенными разрезами разных членов хроноряда приходится использовать общий доверительный интервал $\pm 2.8S$, где S — среднеквадратическое отклонение показателя, отражающее пространственное варьирование. Если использовать оценки величины S , полученные для исследуемых объектов на территории ВНИИМЗ в Тверской области, то для слоя 0—30 см в среднем получается доверительный интервал $2.8 \times 10 \text{ т/га} = 28 \text{ т/га}$, для слоя 0—40 см он шире — в среднем $\pm 35 \text{ т/га}$, минимум $\pm 12 \text{ т/га}$, максимум $\pm 62 \text{ т/га}$. Применяя эти заниженные оценки (поскольку они приведены для слоя 0—40 см) доверительного интервала к запасам $C_{орг}$ в слое 0—50 см в хронорядах из работы [17], получим незначимое различие всех членов каждого хроноряда. Из этого следует необходимость более тщательного составления хронорядов, с одной стороны, и обязательной оценки пространственного варьирования свойств почв на каждой площадке, которая включается в хроноряд, с другой.

Запасы $C_{орг}$ в слое 0—30 см в песчаных почвах сенокоса (ЕМ-32) во ВНИИМЗ, составляющие $64 \pm 12 \text{ т/га}$ (среднее \pm среднеквадратическое отклонение), соответствуют оценкам ФАО 60—80 т/га для таежной зоны России [47]. Близкие значения (52 т/га в слое 0—30 см) получены для сенокоса на агродерново-подзолистой реградированной суглинистой почве Костромской области [33], 66.5 т/га в слое 0—50 см в Карелии [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для тестового полигона на территории ВНИИМЗ в Тверской области получены числовые значения оценок базового уровня содержания, запасов органического углерода, плотности почв, показателей их пространственного варьирования и дифференцированного вертикального распределения в пределах слоя 0—40 см, охватывающего весь гумусовый слой, в агродерново-подзолистых почвах на морене (Albic

Gleyic Retisols (Episiltic, Anoloamic, Aric, Ochric)) и агродерново-подзолах на песках (Albic Podzols (Arenic, Aric, Ochric)). Эти показатели характеризуют мелиорированную пашню в севообороте, сеяные многолетние травы с длительностью вегетации 5 лет, сенокос и залежи длительностью 10–30 лет на 13 динамических площадках.

Для выбора положения динамических площадок использована разнообразная информация о территории тестового полигона, собранная в единый проект ГИС: рельеф, почвообразующие породы, архивная почвенная карта, повторное современное почвенное обследование, схема землепользования, схема дренажной системы, ретроспективный анализ использования полей, космические снимки, ортофотоплан, полученный на основе съемки с беспилотного летательного аппарата. Каждая динамическая площадка характеризовалась 9 индивидуальными точками опробования с контролем строения почвенного профиля в каждой точке и дифференцированным отбором образцов по глубине тонкими слоями по схеме 0–5, 5–10, 10–20, 20–30 и 30–40 см для получения характеристик пространственного варьирования и вертикального распределения содержания, запасов $C_{орг}$ и плотности.

Установлена высокая пространственная вариабельность содержания $C_{орг}$ в почвах на малых расстояниях (площадка 30×30 м), которая в 5–10 раз выше воспроизводимости определения показателя методом сухого сжигания. Оценки среднеквадратического отклонения запасов $C_{орг}$ нелинейно увеличиваются по мере увеличения мощности оцениваемого слоя от 1–5 т/га для слоя мощностью 5 см до 10–20 т/га для слоя 40 см.

На основе дифференцированного отбора образцов почв по глубине из тонких слоев в пределах слоя 0–40 см установлено следующее.

На пашне в севообороте отмечаются равномерное вертикальное распределение $C_{орг}$ в пределах пахотного горизонта и статистически незначимые различия запасов $C_{орг}$ в слоях 0–10 и 10–20 см.

Динамические площадки с почвами на морене на ровных позициях рельефа на пашне статистически не различаются с запасом $C_{орг}$ в слое 0–30 см 51–55 т/га и в слое 0–40 см 55–61 т/га. В широких ложбинах запас $C_{орг}$ значимо выше: 72 ± 12 и 78 ± 17 т/га в слоях 0–30 и 0–40 см соответственно.

В почвах на морене после вегетации многолетних трав в течение 5 лет и на залежах длительностью от 5 до 20 лет формируется дернина мощностью 3–10 см, аккумулятивное вертикальное распределение $C_{орг}$ с максимумом возле дневной поверхности при отсутствии значимых различий запасов $C_{орг}$ в верхней и нижней частях бывшего пахотного горизонта. При сравнении пашни, 6-летних многолетних трав и 30-летних залежей с

почвами на морене на относительно ровных позициях рельефа общие запасы $C_{орг}$ в слое 0–40 см не имеют значимых отличий между площадками за счет высокого пространственного варьирования на площадках. Значимое увеличение запасов $C_{орг}$ зарегистрировано только для поверхностных горизонтов с дерниной до глубины 10 или 20 см.

В почвах на песках выявлены аналогичные закономерности на общем фоне более низкого содержания и запасов $C_{орг}$, составляющих от 26 до 45 т/га в слое 0–40 см.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят руководство и сотрудников Всероссийского научно-исследовательского института мелиорированных земель за помощь в организации и проведении полевых исследований, а также Испытательный лабораторный центр ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева” за проведение аналитических работ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Важнейшего инновационного проекта государственного значения “Разработка и научное обоснование системы учета бюджета углерода в агроэкосистемах Российской Федерации на основе наземных и дистанционных измерений” (соглашение №ВИП ГЗ/24-4 от 11 марта 2024 г.).

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/S0032180X24120047>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Асылбаев И.Г., Мирсаяпов Р.Р. Пилотный карбоновый полигон: анализ запасов углерода в почвах сельхозугодий // Вестник Казанского гос. аграрного ун-та. 2023. № 4. С. 6–12. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2023-6-12>
- Владыченский А.С., Телеснина В.М., Румянцев К.А., Чалая Т.А. Органическое вещество и биологическая активность постагrogenных почв

- южной тайги (на примере Костромской области) // Почвоведение. 2013. № 5. С. 570–590.
<https://doi.org/10.1134/S1064229313050141>
3. Гвоздецкий Н.А., Жучкова В.К. Физико-географическое районирование нечерноземного центра. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1963. 451 с.
 4. ГОСТ 26213-2021. Почвы. Методы определения органического вещества.
 5. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 320 с.
 6. Дубровина И.А., Мошкина Е.В., Сидорова В.А., Тютюннен А.В., Карпечко 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>
 7. Иванова Н.Н., Капсамун А.Д., Павлючик Е.Н., Амбросимова Н.Н. Формирование продукционного процесса пастбищных травостоев на осушаемых почвах в зависимости от их видового состава // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2018. Т. 64. № 3. С. 56–61.
<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2018.64.3.56-61>
 8. Иванова Н.Н., Капсамун А.Д., Павлючик Е.Н., Вагунин Д.А., Амбросимова Н.Н. Устойчивость многолетних трав при длительном использовании в условиях осушаемых земель Нечерноземной зоны // Бюл. науки и практики. 2019. Т. 5. № 4. С. 189–196.
<https://doi.org/10.33619/2414-2948/41/23>
 9. Карта почвенно-экологического районирования Российской Федерации, масштаб 1 : 2 500 000 / Под ред. Добровольского Г.В. и Урусевской И.С. М.: Изд-во МГУ, 2013.
 10. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
 11. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 223 с.
 12. Козут Б.М., Милановский Е.Ю., Хаматнуров Ш.А. О методах определения содержания органического углерода в почвах (критический обзор) // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2023. Вып. 114. С. 5–28.
<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-114-5-28>
 13. Курганова И.Н., Телеснина В.М., Лопес Де Гереню В.О., Личко В.И., Овсепян Л.А. Изменение запасов углерода, микробной и ферментативной активности агродерново-подзолов южной тайги в ходе постагрогенной эволюции // Почвоведение. 2022. № 7. С. 825–842.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22070073>
 14. Курганова И.Н., Лопес Де Гереню В.О., Инн С.Л., Каганов В.В., Хорошаев Д.А., Рухович Д.И., Сумин Ю.В., Дурманов Н.Д., Кузяков Я.В. Пилотный карбоновый полигон в России: анализ запасов углерода в почвах и растительности // Почвы и окружающая среда. 2022. № 2. С. 6–21.
<https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.169>
 15. Ландшафтная карта СССР. Масштаб 1:2 500 000 / Под ред. Гудилина И.С. М.: 1980. 16 листов. Легенда к ландшафтной карте СССР масштаба 1:2 500 000. М.: Министерство геологии СССР, 1987. 339 с.
 16. Ландшафтная карта СССР. М-б 1 : 4 000 000 / Под ред. Исаченко А.Г. М.: ГУГК, 1988.
 17. 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.
 18. Павлючик Е.Н., Капсамун А.Д., Иванова Н.Н. Урожайность бобово-злаковых травосмесей при применении минеральной подкормки // Кормопроизводство. 2022. № 3. С. 10–15.
<https://doi.org/10.25685/KRM.2022.3.2022.001>
 19. Павлючик Е.Н., Капсамун А.Д., Иванова Н.Н. Адаптивность бобово-злаковых травосмесей с использованием перспективных сортов к климатическим условиям на осушаемых землях Тверской области // Кормопроизводство. 2023. № 6. С. 3–7.
<https://doi.org/10.25685/KRM.2023.6.2023.008>
 20. Полевой определитель почв России. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
 21. Поручение Президента РФ от 02 мая 2021 г. № ПР-753
 22. Постановление Правительства РФ от 08 февраля 2022 г. № 133
 23. Постановление Правительства РФ от 29.10.2022 № 3240-р
 24. Природно-сельскохозяйственное районирование и использование земельного фонда СССР. М.: Колос, 1983. 336 с.
 25. Романовская А.А. Органический углерод в почвах залежных земель России // Почвоведение. 2006. № 1. С. 52–61.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X2360018X>
 26. Романовская А.А., Коротков В.Н., Карабань Р.Т., Смирнов Н.С. Динамика элементов баланса углерода на неиспользуемых пахотных угодьях Валдайской возвышенности // Экология. 2012. № 5. С. 347.
 27. Российский национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом. М.: ИГКЭ, 2023
 28. Рухович Д.И., Рухович А.Д., Рухович Д.Д., Симакова М.С., Куляница А.Л., Брызжев А.В., Королева П.В. Информативность коэффициентов а и b линии почв для анализа материалов дистанционного зондирования // Почвоведение. 2016. № 8. С. 903–917.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X16080128>

29. Рыжова И.М., Ерохова А.А., Подвезенная М.А. Динамика и структура запасов углерода в постагрогенных экосистемах южной тайги // Почвоведение. 2014. № 12. С. 1426–1435.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X14090111>
30. Рыжова И.М., Телеснина В.М., Ситникова А.А. Динамика свойств почв и структуры запасов углерода в постагрогенных экосистемах в процессе естественного лесовосстановления // Почвоведение. 2020. № 2. С. 230–243.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X20020100>
31. Симонова Ю.В., Русаков А.В., Рюмин А.Г. Вариабельность запасов углерода на уровне пробных площадок (Ярославская область, Верхняя Волга) // Природная и антропогенная неоднородность почв и статистические методы ее изучения. М.: Дашков и К°, 2022. С. 37–42.
32. Столбовой В.С., Филь П.П. Оценка содержания углерода в сельскохозяйственных почвах Европейской территории России для климатических проектов // Известия РАН. Сер. географическая. 2023. Т. 87. № 4. С. 568–583.
<https://doi.org/10.31857/S2587556623040143>
33. Телеснина В.М., Курганова И.Н., Лопес Де Гереню В.О. Овсепян Л.А., Личко В.И., Ермолаев А.М., Мурин Д.М. Динамика свойств почв и состава растительности в ходе постагрогенного развития в разных биоклиматических зонах // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1514–1534.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X17120115>
34. Телеснина В.М., Жуков М.А. Влияние способа сельскохозяйственного освоения на динамику биологического круговорота и ряда почвенных свойств в ходе постагрогенной сукцессии (Костромская область) // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1114–1129.
<https://doi.org/10.1134/S0032180X1907013X>
35. 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.
36. 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>
37. Хитров Н.Б., Герасимова М.И. Предлагаемые изменения в классификации почв России: диагностические признаки и почвообразующие породы // Почвоведение. 2022. № 1. С. 3–4.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22010087>
38. Хитров Н.Б., Никитин Д.А., Иванова Е.А., Семенов М.В. Пространственно-временная изменчивость содержания и запаса органического вещества почвы: аналитический обзор // Почвоведение. 2023. № 12. С. 1493–1521.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X23600841>
39. Шейн Е.В., Иванов Д.А., Болотов А.Г., Дембовецкий А.В. Гранулометрический состав почв конечно-моренной гряды Верхневолжского постледникового района (Восточно-Европейская равнина, Тверская область) // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2022. Вып. 110. С. 5–21.
<https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-110-5-21>
40. 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. 2008. V. 72. P. 1370–1374.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0342>
41. A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol. FAO, Rome, 2020.
<https://doi.org/10.4060/cb0509en>
42. Bai Y., Zhou Y. The main factors controlling spatial variability of soil organic carbon in a small karst watershed, Guizhou Province, China // Geoderma. 2020. V. 357. P. 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113938>
43. Breil N.L., Lamaze T., Bustillo V., Marcato-Romain C.-E., Coudert B., Queguiner S., Jarosz-Pellé N. Combined impact of no-tillage and cover crops on soil carbon stocks and fluxes in maize crops // Soil Till. Res. 2023. V. 233. P. 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105782>
44. Conant R.T., Paustian K. Spatial variability of soil organic carbon in grasslands: implications for detecting change at different scales // Environ. Poll. 2002. V. 116. P. 127–135.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105782>
45. Demattê J.A.M., Fongaro C., Rizzo R., Safanelli J. Geospatial Soil Sensing System (GEOS3): A powerful data mining procedure to retrieve soil spectral reflectance from satellite images // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 212. P. 161–175.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.047>
46. Demattê J.A.M., Safanelli J.L., Poppiel R.R., Rizzo R., Silvero N.E.Q., Mendes W.S., Bonfatti B.R., et al. Bare earth's surface spectra as a proxy for soil resource monitoring // Scientific Reports. 2020. V. 10. P. 4461.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-61408-1>
47. 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>
48. Don A., Schumacher J., Scherer-Lorenzen M., Scholten T., Schulze E.-D. Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites – Implications for measuring soil carbon stocks // Geoderma. 2007. V. 141. P. 272–282.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.06.003>
49. 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 2023. No. 187. Rome, FAO.
<https://doi.org/10.4060/cc3981en>
50. IPCC, 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme / Eds. Eggleston H.S. et al. Hayama: Inst. Glob. Envir. Strateg., 2006.
 51. IUSS Working Group WRB. 2022. World Reference Base for Soil Resources. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. 4th edition. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria. 234 p.
 52. 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>
 53. LANDSAT 4-7 surface reflectance (LEDAPS) product guide. USGS, 2018.
 54. LANDSAT 8 surface reflectance code (LASRC) product guide. USGS, 2018.
 55. Knotters M., Teuling K., Reijneveld A., Lesschen J.P., Kuikman P. Changes in organic matter contents and carbon stocks in Dutch soils, 1998–2018 // Geoderma. 2022. V. 414. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115751>
 56. Meurer K.H.E., Haddaway N.R., Bolinder M.A., Kätterer T. Tillage intensity affects total SOC stocks in boreo-temperate regions only in the topsoil—A systematic review using an ESM approach // Earth-Sci. Rev. 2018. V. 177. P. 613–622.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.12.015>
 57. 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. 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113260>
 58. Poeplau C., Prietz R., Don A. Plot-scale variability of organic carbon in temperate agricultural soils—Implications for soil monitoring // J. Plant Nutrition Soil Sci. 2022. V. 185. P. 403–416.
<https://doi.org/10.1002/jpln.202100393>
 59. Romanenkov V.A., Smith J., Smith P., Sirotenko O., Rukhovitch D., Romanenko I. Soil organic carbon dynamics of croplands in European Russia // Regional Environmental Change. 2007. V. 7. P. 93–104.
<https://doi.org/10.1007/s10113-007-0031-7>
 60. Roujean J.L., Leroy M., Deschamps P.Y. A bidirectional reflectance model of the Earth's surface for the correction of remote sensing data // J. Geophys. Res: Atmospheres. 1992. V. 97. No. D18. P. 20455–20468.
<https://doi.org/10.1029/92JD01411>
 61. Rukhovitch 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>
 62. Schipper L.A., Mudge P.L., Kirschbaum M.U. F., Hedley C.B., Golubiewski N.E., Smaill S.J., Kelliher F.M. Soil order and grazing management effects on changes in soil C and N in New Zealand pastures // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2014. V. 184. P. 67–75.
<https://doi.org/10.1080/00288233.2017.1284134>
 63. Schrumpp 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>
 64. Skinner R.H., Dell C.J. Comparing pasture C sequestration estimates from eddy covariance and soil cores // Agriculture, Ecosystems and Environment. 2015. V. 199. P. 52–57.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2014.08.020>
 65. Skalský R., Barančíková G., Makovníková J., Koco Š., Halas J., Kobza J. Regional topsoil organic carbon content in the agricultural soils of Slovakia and its drivers, as revealed by the most recent national soil monitoring data // Environmental Challenges. 2024. V. 14. P. 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100816>
 66. Sleutel S., De Neve S., Hofman G. Estimates of carbon stock changes in Belgian cropland // Soil Use and Management. 2003. V. 19. P. 166–171.
<https://doi.org/10.1079/SUM2003187>
 67. Stolbovoy V., Montanarella L., Panagos P. Carbon Sink Enhancement in Soils of Europe: Data, Modeling, Verification. European Communities, 2007.
 68. Tamiminia H., Salehi B., Mahdianpari M., Quackenbush L., Adeli S., Brisco B. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review // ISPRS J. Photogrammetry Remote Sensing. 2020. V. 164. P. 152–170.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>
 69. Visschers R., Finke P.A., De Grijter J.J. A soil sampling program for the Netherlands // Geoderma. 2007. V. 139. P. 60–72.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.01.008>
 70. Wiesmeier M., Urbanski L., Hobley E., Lang B., von Lütow M., Marin-Spiotta E., van Wesemael B., Rabot E., Ließ M., Garcia-Franco N., Wollschläger U., Vogel H.-J., Kögel-Knabner I. Soil organic carbon storage as a key function of soils—A review of drivers and indicators at various scales // Geoderma. 2019. V. 333. P. 149–162.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>
 71. 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. 1–8.
<https://doi.org/10.1111/ejss.12002>
 72. Xie E., Zhang Y., Huang B., Zhao Y., Shi X., Hu W., Qu M. Spatiotemporal variations in soil organic carbon and their drivers in southeastern China during 1981–2011 // Soil Till. Res. 2021. V. 205. P. 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104763>

Influence of Landuse and Parent Materials on Soil Organic Carbon Content and Storages in Drained Soddy-Podzolic Soils, Tver Region

N. I. Lozbenev^{1,*}, D. N. Kozlov¹, P. P. Fil¹, N. B. Khitrov¹, and P. M. Shilov¹

¹Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia

**e-mail: nlozbenev@mail.ru*

Results 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 in agrosoddy-podzolic soils formed from till (Albic Gleyic Retisols (Episiltic, Anoloamic, Aric, Ochric)) and agrosoddy-podzols formed from sands (Albic Podzols (Arenic, Aric, Ochric)) at drained arable lands, hayfield and agricultural fallow lands using 13 dynamic plots of the VNIIMZ test polygon in Tver Region (Russia) are submitted. SOC content has high spatial variability at small distance (plot 30 × 30 m) that is 5–10 times larger than reproducibility of SOM determination by dry combustion. Evaluations of standard deviation of SOC storages nonlinear are increased as the layer thickness increasing from 1–5 t/ha for 5-cm-layer till 10–20 t/ha for 40-cm-layer. Based on differentiated sampling of soils by depth from thin layers within the 0–40 cm layer, the following was established. Uniform vertical distribution of SOC content within plow horizon and statistically insignificant differences in SOC storages in 0–10 and 10–20 cm layers are found in soils at arable lands with crop rotation. Turf about 3–10 cm thickness, accumulative vertical distribution of SOC content with maximum near soil surface and absence of significant difference between SOC storages in upper and bottom parts of former plow horizon are formed in soils from till after perennial herbs vegetation during 6 years and agricultural fallows during 5–10 years. In soils on sand, similar patterns were revealed against the general background of lower SOC content and storages.

Keywords: sandy soils, Albic Podzols, Albic Retisols, arable land, hayfield, agricultural fallow, perennial herbs, spatial variability