

УДК 631.421:631.9

<https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.318>

Карбоновый полигон «Покровский»: методические аспекты организации полевого опыта по оценке влияния многолетних кормовых культур на секвестрацию углерода почвами агроэкосистем

© 2025 Г. В. Матышак , М. В. Архипова , Н. Д. Дурманов , О. Ю. Гончарова , М. И. Кондрашкина , С.Н. Корденков 

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», ул. Мясницкая, д. 20б, г. Москва, 101000, Россия. E-mail: matyshak@gmail.com

Цель исследования. Дать общую характеристику истории землепользования и свойств почв залежных участков, отведенных под экспериментальные поля на карбоновом полигоне «Покровский»; обосновать методологию закладки полевого опыта по оценке влияния многолетних кормовых культур на секвестрацию углерода почвами.

Место и время проведения. Исследования проводили на экспериментальных полях полигона «Покровский», расположенного в центре Восточно-Европейской равнины на границе Смоленской и Калужской областей в среднем течении р. Угра в 2023–2024 годах.

Методы. Исследования включали: характеристику истории землепользования на основе исторических картографических материалов, подробное картографирование почвенного покрова участка, оценку химических, физических, агрохимических свойств почв стандартными методами, а также оценку их биологической активности на основе измерения эмиссии CO₂ с поверхности почвы камерным методом.

Основные результаты. Агродерново-подзолистые почвы экспериментальных полей характеризовались низкими запасами гумуса и средней степенью обеспеченности питательными элементами с высокой степенью варьирования. Запасы углерода в слое 0–20 см почвы двух экспериментальных полей составили 38,3 и 41,3 т/га. Установлено, что в весенний период до посева культур почвы повторностей закладываемого полевого опыта значимо не различались по таким показателям как: температура, влажность, эмиссия CO₂. Вклад корневого дыхания в эмиссию CO₂ составил около 50% на пике вегетации для злаковых смесей и бобовых культур.

Заключение. К лету 2024 года на карбоновом полигоне «Покровский» имелось четыре экспериментальных участка, располагающихся на двух полях. Три участка организованы в начале 2023 года: монодоминантная посадка клевера лугового, смесь многолетних злаковых культур и клевера лугового и многолетние злаковые культуры. На четвёртом участке в конце весны 2024 года заложен однофакторный полевой деляночный опыт с многолетними бобово-злаковыми смесями, подобранными с учетом их физиологических особенностей и влияния на секвестрацию углерода, на идентичных по физико-химическим и биологическим почвенным показателям делянках.

Ключевые слова: дерново-подзолистые почвы; карбоновый полигон; полевой деляночный опыт; почвопокровные культуры; секвестрация углерода; эмиссия CO₂.

Цитирование: Матышак Г.В., Архипова М.В., Дурманов Н.Д., Гончарова О.Ю., Кондрашкина М.И., Корденков С.Н. Карбоновый полигон «Покровский»: методические аспекты организации полевого опыта по оценке влияния многолетних кормовых культур на секвестрацию углерода почвами агроэкосистем // Почвы и окружающая среда. 2025. Том 8. № 3. е318. DOI: [10.31251/pos.v8i3.318](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.318)

ВВЕДЕНИЕ

Органическое вещество почв играет ключевую роль с точки зрения секвестрации атмосферного CO₂. В мире содержание углерода в почвах превышает его содержание в растительной биомассе в 3 раза, а в России, занимающей большую часть площади Северной Евразии, в 7,5 раз (Кудеяров, 2015; Кудеяров и др., 2007). Именно поэтому баланс углерода является главным критерием эффективности ведения сельскохозяйственной деятельности с учётом стремления к углеродной нейтральности (Сычѳв, Налиухин, 2021). Дегумусирование (процесс уменьшения содержания в почве органического углерода и мощности гумусового профиля с ухудшением качественного состава почвенного органического вещества (Семенов, Когут, 2015)) – практически повсеместно имеет место при активном сельскохозяйственном производстве, т.е. земли сельскохозяйственного назначения являются, в большинстве своем, источником CO₂ в атмосферу. В настоящее время, в связи с усиливающейся климатической повесткой, ведется поиск новых систем земледелия, реализация которых позволила бы, с одной стороны, повысить эффективность сельского хозяйства, а с другой – сделать его

ресурсосберегающим. Перспективной является адаптивная интенсификация сельского хозяйства, которая ориентирует на необходимость более полного использования природных ресурсов за счет биологизации в агроэкосистемах, внедрения методов, обеспечивающих восстановление почв в процессе использования, применения технологий, обеспечивающих уменьшение поступления парниковых газов в атмосферу при ведении регенеративного (восстановительного) сельского хозяйства (Соколов и др., 2019; Битва за климат ..., 2021). Внедрение методов хозяйствования, связанных с использованием покровных культур, отказ от пропашных культур, ограничение механической обработки почвы и сохранение пожнивных остатков на поверхности почвы и т. д. могут иметь основополагающую роль в декарбонизации агроландшафтов (Бахмет и др., 2023). Многолетние травы и их травосмеси со злаковыми и бобовыми культурами – один из важнейших средоулучшающих ресурсов и восстановителей почвенного плодородия (Пуртова, Тимофеева, 2024). Включение их в сельскохозяйственные севообороты давно используется по многим причинам, роль многолетних трав и травосмесей в агроландшафтах весьма многогранна. Их использование способствует повышению коэффициента полезного потребления солнечной энергии, обогащению почв органическими соединениями и доступными для растений формами биофильных элементов (азот, фосфор, калий, кальций, магний), улучшению агрофизических, биологических и биохимических свойств почв и способствует уменьшению потерь органического вещества из почв при развитии эрозийных процессов (Пуртова, Тимофеева, 2024). Из всех сельскохозяйственных культур, многолетние травы обеспечивают наибольшее поступление в почву корневой массы. Использование многолетних бобово-злаковых травосмесей минимизирует необходимость применения минеральных азотных удобрений и увеличивает фотосинтетическую продуктивность агроценоза (Бахмет и др., 2023). Включение в севооборот почвопокровных культур показывает статистически значимую корреляцию увеличения содержания органического углерода ($C_{\text{орг}}$) с улучшением качества почвы, а именно, с уменьшением эрозии и увеличением содержания минерализуемого органического вещества. Полученная средняя величина связывания углерода покровными культурами составила 0,56 т С/га в год. Многовидовые смеси покровных культур показывают большее увеличение $C_{\text{орг}}$ в почвах по сравнению с моновидовыми покровными культурами. Использование посевов многолетних бобовых трав вызывает большую прибавку почвенного органического вещества, чем посевы многолетних злаковых трав (Кудеяров, 2022).

Учёт потоков парниковых газов и оценка углеродного баланса на землях сельскохозяйственного назначения не могут быть произведены в краткосрочных экспериментах, что связано с природной устойчивостью почвенного органического вещества, длительностью его формирования и сложностью строения. Длительные полевые опыты являются уникальными агрохимическими экспериментами, с помощью которых возможно динамическое моделирование выбросов и поглощения углерода. Мировой опыт свидетельствует, что стационарные эксперименты могут рассматриваться как источники независимых данных по оценке потоков углерода и азота (Сычев, Налиухин, 2021; Paul et al., 2015). Уникальными площадками для такого рода опытов могут стать «карбоновые полигоны» – территории для исследования биогеохимического цикла углерода в наиболее типичных экосистемах. Проект Минобрнауки по созданию карбоновых полигонов на территории Российской Федерации стартовал в начале 2021 г. (Карбоновые полигоны ..., 2021). Отдельным направлением данного проекта являются аграрные карбоновые полигоны, основные задачи которых – почвенные измерения, отработка технологий депонирования атмосферного углекислого газа в биомассе и почве, то есть секвестрация атмосферного углекислого газа за счет его перевода в углерод биомассы или почву. Предполагается, что именно эти технологии лягут в основу индустриальных природно-климатических проектов (Разработки российских ученых ..., 2022).

Задачи исследования включали: (1) общую характеристику истории землепользования и почв залежных полей, отведенных под полевые опыты на карбоновом полигоне «Покровский»; (2) обоснование методологии заложения полевого опыта; (3) оценку пространственной вариативности запасов углерода, агрохимических и физических свойств гумусового горизонта почв экспериментальных участков; (4) оценку стартовых (до начала экспериментов) величин биологической активности почв.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Природные условия. Полигон «Покровский» расположен в центре Восточно-Европейской равнины, на границе Смоленской и Калужской областей, в среднем течении р. Угра (рис. 1).

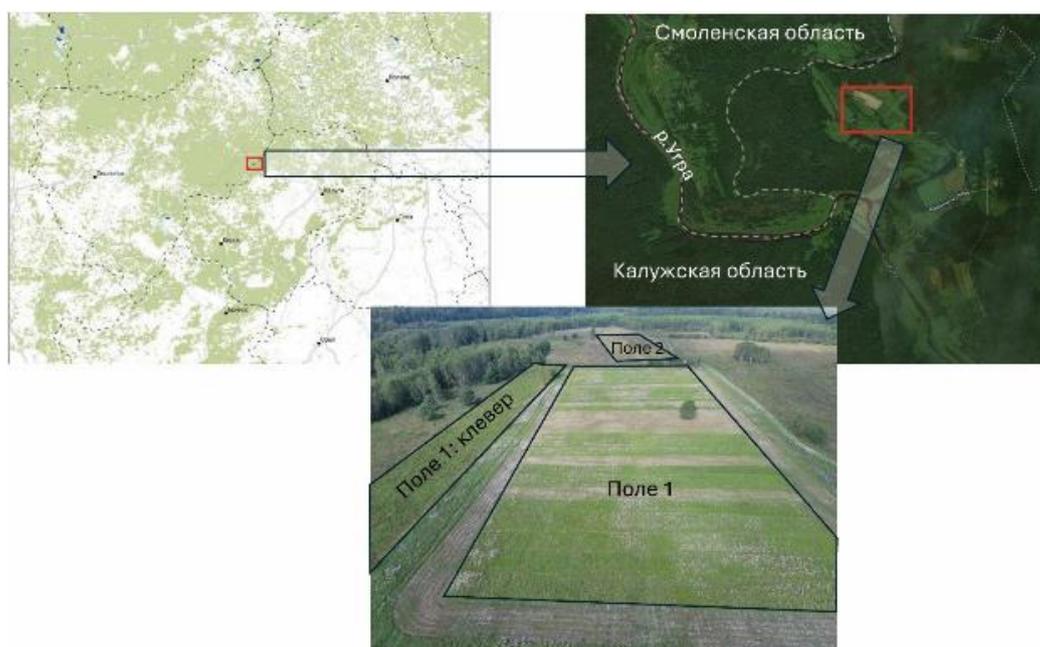


Рисунок 1. Расположение экспериментальных участков полигона «Покровский».

Климат территории умеренно-континентальный; среднегодовая температура воздуха – $+3,5^{\circ}$ – $+4,5^{\circ}$, среднегодовое количество осадков – 600–700 мм. Четвертичные породы представлены ледниковыми отложениями – моренными с гравием, галькой и валунами, частично перекрытые песками и супесями (Геологическая карта ..., 1998). Согласно зональному делению (Биоразнообразие биомов России ..., 2020) территория исследования расположена в пределах подзоны подтайги на границе ее северной и южной полосы; здесь произрастают ельники и сосняки бореальные и субнеморальные. Полигон расположен на пологом склоне юго-западной экспозиции к пойменной террасе р. Воря и представляет собой 2 крупных экспериментальных участка – Поле 1 и Поле 2, заложенных в пределах бывших с/х земель, вышедших из активного использования более 30 лет назад.

История землепользования. На основе изучения исторических картографических материалов XVIII–XX веков и современных космических снимков проведен анализ истории землепользования полигона. С конца XVIII века территория находилась в сельскохозяйственном обороте, при этом с середины XIX по середину XX века часть Поля 2 была занята деревней Ильмезьево. Деревня была разрушена в ходе Великой Отечественной войны (ВОВ) и ее территория включалась в сельскохозяйственный оборот до 1990-х годов. После распада СССР распашка территории прекратилась и поля постепенно заросли мелколиственной порослью деревьев. Поле 1 заросло к 2012 году, за исключением южной части экспериментальной площадки III. На Поле 2 за это время появились отдельно стоящие деревья. В 2017 году поля были расчищены от поросли, а Поле 2 распашано. К 2020 году Поле 1 повторно заросло мелколиственной порослью, на Поле 2, благодаря сельскохозяйственным мероприятиям, этого не происходило. В 2021 году Поле 1 было повторно расчищено и распашано (рис. 2).



Рисунок 2. История землепользования полей Полигона Покровский: А – Поле 1; Б – Поле 2.

Поле 1 имеет прямоугольное очертание со сторонами 150 на 300 м и вытянуто с юго-запада на северо-восток. В настоящее время на Поле 1 расположены 2 экспериментальные площадки. В 2023 году в юго-западной (нижней) части поля была заложена экспериментальная площадка с посадкой клевера лугового (*Trifolium pratense* L.) на площади 0,7 га (Поле 1_ клевер, рис. 3А).

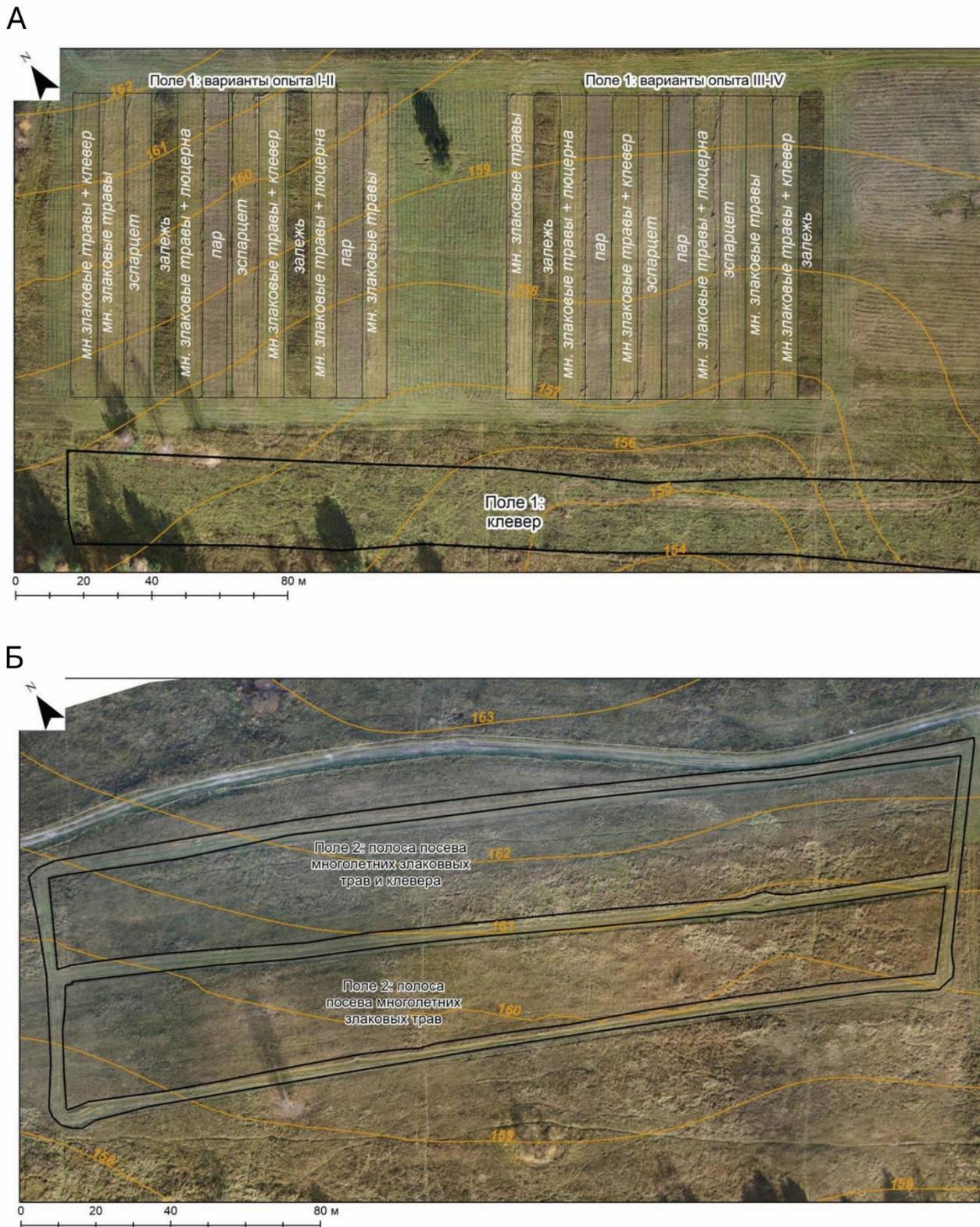


Рисунок 3. Экспериментальные площадки Поля 1 (А) и Поля 2 (Б).

Другая экспериментальная площадка на Поле 1 представляет собой однофакторный многолетний полевой опыт по изучению секвестрации CO₂ под многолетними бобово-злаковыми травосмесями, заложенный весной 2024 года на распаханной площади размером 250×100 м (рис. 3А).

Организация эксперимента. Было заложено шесть вариантов опыта в четырех повторениях, всего 24 делянки. Площадь одной опытной делянки составляет 630 м² (7×90 м), делянки разделены боковыми защитными полосами шириной 0,8 м, опыт ограничен концевыми защитными полосами шириной 15–20 м. Боковые защитные полосы выделяют вдоль длинных сторон делянок для исключения влияния растений соседних вариантов, концевые – для предохранения учетной части делянки от случайных повреждений. Между повторениями II и III организована защитная полоса около 30 м из-за растущей единичной сосны, что необходимо для исключения влияния кроны и корневой системы дерева на посеvy. В каждом повторении опыта делянки размещены методом рандомизированных повторений (Доспехов, 1985). Схема полевого опыта представлена на рисунке 3А. В полевом опыте использованы двух- и многокомпонентные бобово-злаковые травосмеси, моновидовой посев эспарцета (табл. 1). Подбор культур осуществляли с учетом нескольких аспектов. Многолетние травы, используемые в полевом опыте, должны обеспечить покров почвы в течение всего периода вегетации. Кроме этого, многолетние бобовые травы (сем. Fabaceae) обогащают почву азотом, в условиях длительного вегетационного периода (весна +5°C и до поздней осени) защищают почву от эрозии, предохраняют от вымывания питательных веществ за пределы корнеобитаемого слоя, способствуют накоплению органического вещества в почве, дают значительное количество питательного корма для скота. В период вегетации многолетних бобовых трав в почве накапливается значительное количество азота: под клевером – 100–150 кг/га, под люцерной – до 300 кг/га (Эседуллаев, 2017; Шмелева, 2021). Многолетние злаковые травы (сем. Мятликовые – Poaceae) при кущении образуют значительное количество корней, которые после укоса надземной части остаются в почве и способствуют накоплению органического вещества, улучшают ее физические свойства за счет создания агрономически ценной структуры. При благоприятных условиях злаковые травы дают высокие урожаи в течение 5–10 лет выращивания на одном месте (Эседуллаев, 2017). При выращивании многолетних бобово-злаковых травяных смесей происходит объединение факторов их положительного влияния на почву в плане создания агрономически ценной структуры, накопления азота и органического вещества. В качестве контроля, т.е. условий, при которых секвестрация CO₂ не происходит в связи с отсутствием зеленой растительности, выбран пар. Залежь моделирует ситуацию постагрогенной сукцессии пахотных земель. Зарастание ее происходит за счет диаспор, находящихся в почве и привноса семян с окружающей территории.

Таблица 1

Состав травосмесей, использованных для организации эксперимента на делянках Поля 1

Культура	Состав травосмесей	Доля культуры, %	Норма высева, кг/га
Многолетние злаковые травы	Кострец безостый – <i>Bromus inermis</i> Leyss.	30	40
	Фестулолиум – х <i>Festulolium</i>	20	
	Райграс пастбищный – <i>Lolium perenne</i> L.	30	
	Овсяница луговая – <i>Festuca pratensis</i> Huds.	20	
Многолетние злаковые травы + клевер луговой	Клевер луговой – <i>Trifolium pratense</i> L.	20	35
	Тимофеевка луговая – <i>Phleum pratense</i> L.	20	
	Овсяница луговая – <i>Festuca pratensis</i> Huds.	30	
	Райграс пастбищный – <i>Lolium perenne</i> L.	30	
Многолетние злаковые травы + люцерна посевная	Люцерна изменчивая – <i>Medicago sativa</i> L.	70	25
	Фестулолиум – х <i>Festulolium</i>	30	
Эспарцет	<i>Onobrychis</i> L. сорт Алтайский	100	90

Поле 2 расположено приблизительно в 300 метрах на северо-запад от Поля 1 и отделено от него лесозащитной полосой. Оно имеет прямоугольную форму со сторонами 80х250 м и также вытянуто с юго-запада на северо-восток как и Поле 1 (рис. 3Б). В 2023 году на Поле 2 были заложены две параллельные друг другу экспериментальные площадки 40х250 м. На северо-восточной половине (верхняя часть) Поля 2 осуществлен посев многолетних злаковых культур (*Phleum pratense*, *Festuca pratensis*, *Festuca arundinacea*, *Festulolium*) и клевера лугового (0,7 га) (Поле 2_клевер), на юго-западной половине (нижняя часть) были высеяны многолетние злаковые травы (0,65 га) (Поле 2_травы). Все посеvy отгорожены от окружающей территории и между собой защитными полосами.

Таким образом, к полевому сезону 2024 года полигон «Покровский» представлял собой 2 экспериментальных поля: Поле 1 (площадью 2,32 га) с организованным на нем в 2024 году делянчным экспериментом (24 делянки) с различными вариантами посева многолетних трав и участком 2023 года, засеянным клевером (Поле 1_клевер) и Поле 2 (площадью 1,33 га) с двумя участками посева многолетних трав (Поле 2_травы, Поле 2_клевер), организованными в 2023 году.

Методы исследования. Для определения основных почвенных характеристик и отбора образцов почв на каждом из экспериментальных полей (Поле 1 и Поле 2) заложено по одному полнопрофильному почвенному разрезу в северо-западных углах каждого из полей, а также 50 прикопок на Поле 1 и 80 прикопок на Поле 2. Прикопки организовывались по регулярной сетке на всех экспериментальных участках примерно каждые 15 м. В каждой из прикопок даны описания верхних 2 почвенных горизонтов, измерена их мощность, определен гранулометрический состав «мокрым» методом (Качинский, 1965). Морфологическое описание почв проводили по Б.Г. Розанову (2004), название почв дано согласно «Классификация и диагностика почв России» (2004) и IUSS Working Group WRB (2022). Плотность сложения верхнего горизонта определяли буровым методом (Теории и методы физики ..., 2007). С глубины 10 см отобраны образцы гумусового горизонта почв. В лабораторных анализах использованы воздушно-сухие образцы почв, просеянные через сито с диаметром ячеек 2 мм. Определение величины pH (соотношение почвы и вода 1:2,5) проводили потенциометрически на pH-метре И-160 МИ (Россия) (ГОСТ 26423). Содержание органического углерода ($C_{орг}$) определяли титриметрически (метод Тюрина), содержание общего азота (Нобщ) – на автоматическом элементном CHNS-O анализаторе (EA 1110, PerkinElmer). Содержание аммонийной и нитратной форм азота определяли по ГОСТ (26489, 26951). Содержание подвижных соединений калия и фосфора определяли по методу Кирсанова.

Запасы углерода (т/га) в слое 0–20 см исследуемых почв определили по формуле 1:

$$\text{Запасы углерода в слое 0–20 см} = C_{орг} \times BD \times 20 \quad (1),$$

где $C_{орг}$ – содержание $C_{орг}$ в слое (%), BD – плотность почвы ($г/см^3$).

Температуру и объемную влажность почвы в слое 0–10 см определяли при помощи термозондов HI 98509 (HANNA, USA) и полевого влагомера FieldScout 100 (Spectrum, USA), соответственно. Эмиссию CO_2 измеряли методом закрытых камер (Смагин, 2005). Непрозрачные камеры объемом 850 мл и диаметром 10 см с герметичным клапаном для отбора проб, устанавливали на поверхность почвы с удаленной растительностью, заглубляя на 2–3 см. Газовые пробы CO_2 объемом 10–20 мл отбирали из камер в начальный момент времени и через 10 мин. Концентрацию CO_2 в пробе определяли на месте с помощью газового анализатора с инфракрасным датчиком LI-830 (LI-COR, USA). Эмиссионный поток рассчитывали исходя из предположения о линейности роста концентрации CO_2 в камере в период измерений и выражали в $мг\ C/м^2$ в ч. Все измерения проведены в 5-ти кратной повторности в течение 2-х дней для каждой из 24 делянок Поля 1 и в 10-ти кратной повторности на остальных трех опытных участках (Поле 1_клевер, Поле 2_клевер и Поле 2_травы+клевер; всего 150 измерений).

Карты пространственного распределения параметров составляли при помощи интерполяции методом кригинга в программе GoldenSoftware Surfer 21. Средние значения параметров и достоверность различий (при уровне значимости $p < 0,05$) оценивали методами однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA) и корреляционного анализа в программе Statistica 12.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Почвы экспериментальных участков. Почвы исследованной территории классифицированы как дерново-подзолистые постагрогенные (Классификация ..., 2004) и Albic Retisol (Aric) по IUSS Working Group WRB (2022). Этот тип почв имеет широкое распространение на данной территории (Бобровский, 2012). Существенное влияние на морфологический облик и свойства почв территории оказали интенсивная антропогенная деятельность и мозаичный характер почвообразующих пород. Следы деятельности человека, как правило, хорошо заметны по ровной границе между гумусовым (A_{Ура}) и нижележащим элювиальным (подзолистым) почвенным горизонтом (EL). Ее формирование обусловлено активной сельскохозяйственной деятельностью на данной территории, а именно, обработкой почвы плугом; по этой причине, при отсутствии каких-либо других воздействий, данная граница наблюдается на глубинах 25–30 см (глубина вспашки) (рис. 4).

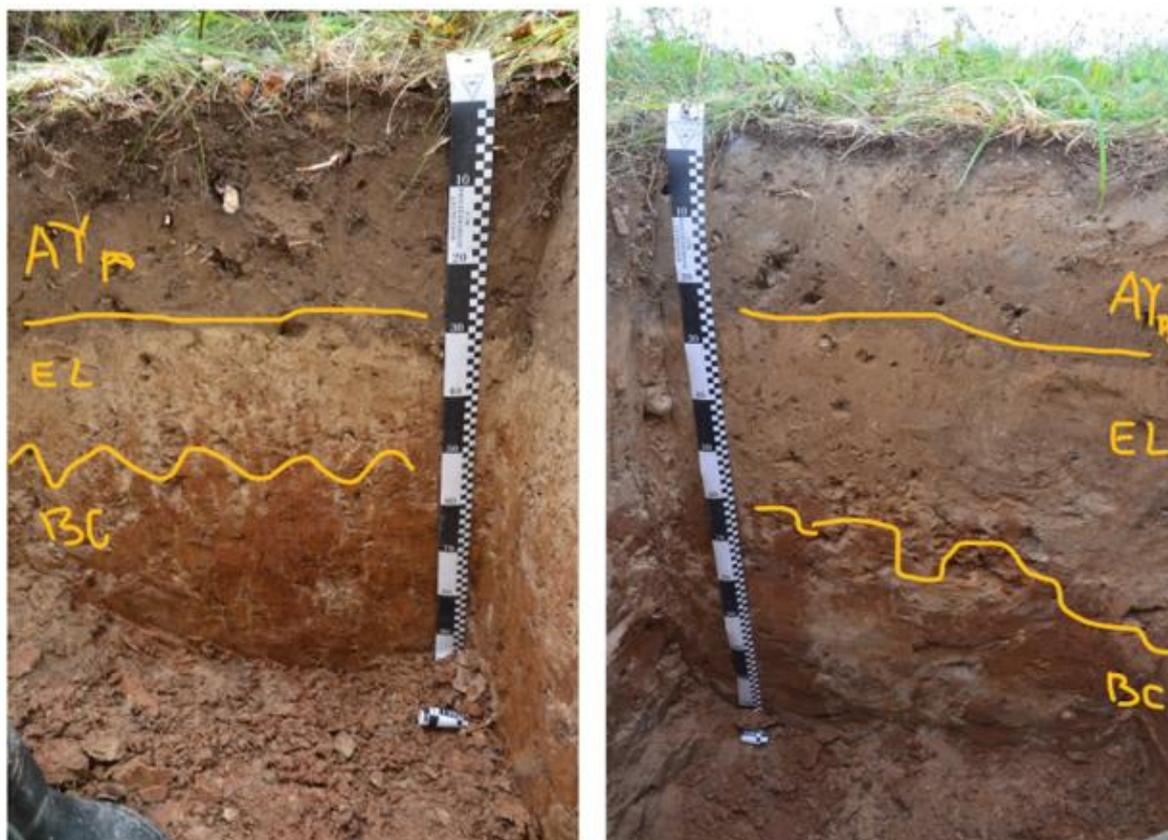


Рисунок 4. Дерново-подзолистая постагрогенная почва Поля 1 и Поля 2 – наиболее типичная почва Полигона.

В профиле дерново-подзолистой почвы на Поле 2 обращает внимание неоднородный характер сильнопереработанных флювиогляциальными процессами переходных к породе почвенных горизонтов. Это приводит к усложнению структуры почвенного покрова и усилению неоднородности почвенных свойств верхнего гумусового горизонта. Мощный и хорошо выраженный осветленный элювиальный горизонт EL свидетельствует о хорошем дренаже и выраженной элювиально-иллювиальной дифференциации несмотря на тяжелосуглинистый характер почвообразующих пород (морена), по-видимому, за счет их высокой опесчаненности. Мощный гумусовый слабоструктуренный горизонт свидетельствует о благоприятных, в целом, условиях для гумусообразования и значимом вкладе в его морфологию антропогенного фактора. Детальный анализ морфологических параметров почв исследованных участков показал, что средняя мощность гумусового горизонта для обоих полей составляет 29,7 см и достоверно не отличается (30,6 и 28,6 см, Поле 1 и 2, соответственно) (табл. 2).

Таблица 2

Морфологические свойства гумусового горизонта почв экспериментальных Полей

Параметр	n	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Нижний квартиль	Верхний квартиль	Стандартное отклонение
Поле 1								
Мощность, см	50	28,6	28,5	18,0	40,0	25,0	31,0	4,66
Плотность, г/см ³	50	1,23	1,23	1,01	1,41	1,19	1,28	0,09
Поле 2								
Мощность, см	59	30,6	30,0	21,0	46,0	26,0	35,0	5,37
Плотность, г/см ³	60	1,21	1,21	0,93	1,42	1,13	1,31	0,12

Общая неоднородность мощности гумусового горизонта для каждого из полей хорошо видна на карте (рис. 5А). Характерной закономерностью является приуроченность повышенной мощности гумусового горизонта к нижним (юго-восточным) частям склонов полей и может быть обусловлена эрозионными процессами смыва-намыва, а также наличием хорошо выраженного и мощного культурного слоя именно в нижних частях обоих полей (следы приусадебных участков урочища Ильмезьево, бывшего на этом месте до середины XX века).

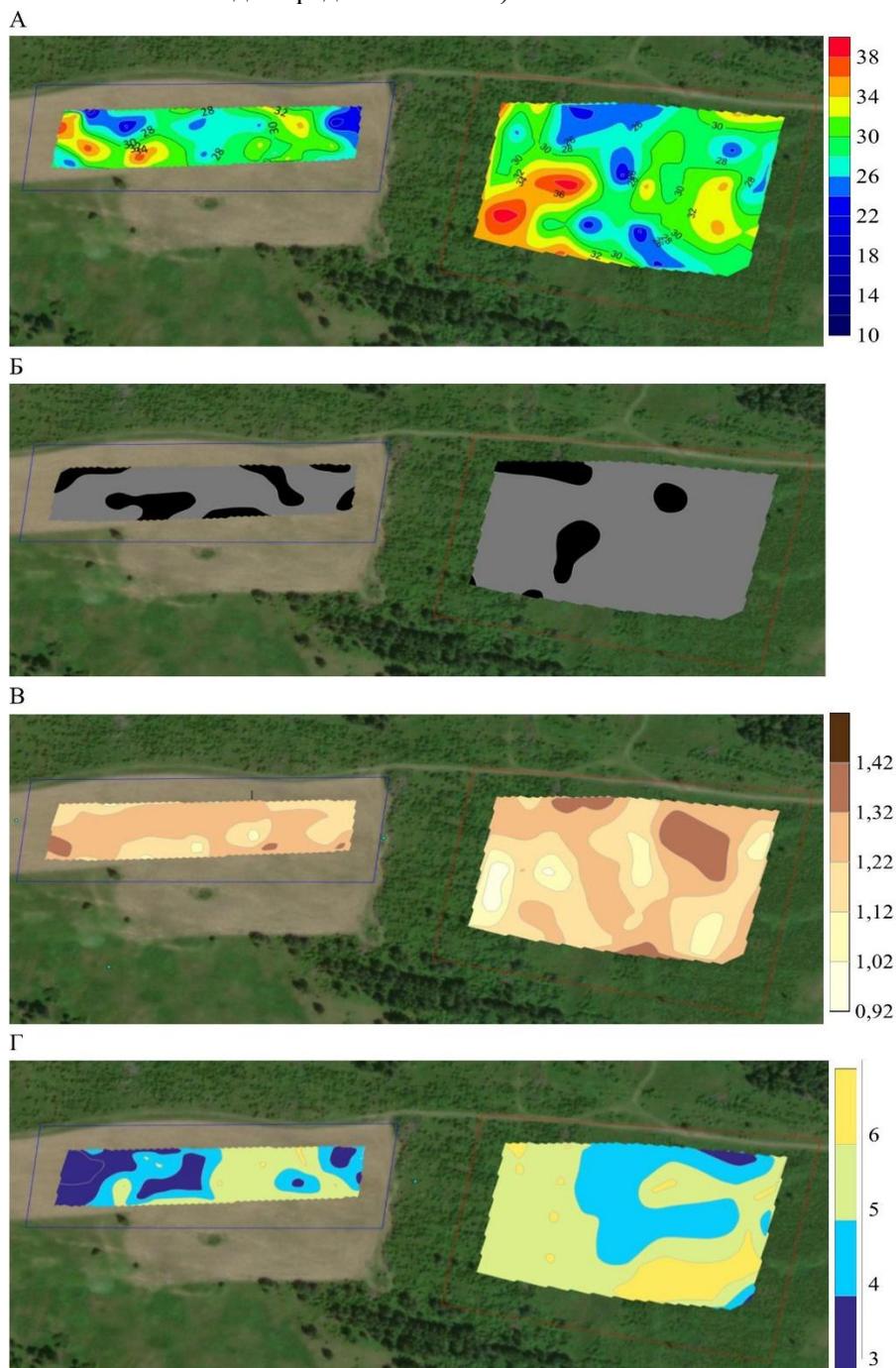


Рисунок 5. Картограммы свойств почв Поля 1 и Поля 2. А – мощность гумусового горизонта (см), Б – наличие/отсутствие горизонта EL (черный цвет – отсутствует, серый – есть), В – плотность гумусового горизонта (г/см^3), Г – гранулометрический состав гумусового горизонта (3 – опесчаненный легкий суглинок, 4 – легкий суглинок, 5 – опесчаненный средний суглинок, 6 – средний суглинок).

О степени выраженности эрозионных процессов можно судить на основе картограммы (рис. 5Б). При постоянной распашке склонов происходит смыв верхних горизонтов почв и подпахивание срединных (вплоть до полного их исчезновения), особенно на возвышенных участках. Поле 2 более подвержено эрозионному смыву; в более чем 20% почв осветленный горизонт EL полностью

отсутствует, так как припахан к гумусовому горизонту. На Поле 1 площадь таких почв менее 6%. Подпахивание нижележащих горизонтов значительно снижает качество плодородного слоя и ухудшает свойства почв. Выраженность этого процесса на Поле 2 говорит о его более активном сельскохозяйственном использовании и более выраженных эрозионных процессах смыва поверхностных почвенных горизонтов.

Плотность сложения гумусового горизонта в среднем составляет $1,22 \text{ г/см}^3$ и не отличается между экспериментальными участками Поля 1 и Поля 2 ($1,23$ и $1,21 \text{ г/см}^3$, соответственно). Поле 1 более неоднородно, гумусовые горизонты верхней части имеют большую плотность, нижней – меньшую, что может быть связано с разным вкладом подпаханных срединных горизонтов, имеющих другую плотность, а также вкладом остатков окультуренных горизонтов, имеющих, как правило, пониженную плотность сложения (рис. 5В).

Гранулометрический состав почвенных горизонтов в основном представлен легким и средним суглинками разной степени опесчаненности (рис. 5Г). Значительная примесь песчаной фракции и преимущественно легкосуглинистый гранулометрический состав гумусового горизонта почв на Поле 2 свидетельствует о существенном нарушении почвенного профиля в результате антропогенной и эрозионной переработки и подпахивания нижележащих горизонтов, имеющих на многих участках супесчаный и песчаный гранулометрический состав с обильными включениями обломочного материала разного размера. На ряде участков в северо-западной части Поля 2 отмечены значительные включения мелкообломочного материала и гальки непосредственно на поверхности почв. Гумусовый горизонт Поля 1 более однороден по гранулометрическому составу и преимущественно среднесуглинистого состава (опесчаненного).

Свойства гумусового горизонта почв экспериментальных полей на момент старта экспериментов. Несмотря на некоторые отличия в морфологии, свойства почв экспериментальных участков Поле 1 и Поле 2 примерно схожи. Гумусовые горизонты Поля 1 более плодородны, мощнее и менее плотны, однако ни по одному из вышеуказанных параметров по результатам дисперсионного анализа достоверно не отличаются от свойств гумусового горизонта Поля 2 (табл. 3).

Таблица 3

Общие свойства и основные агрохимические показатели гумусового горизонта почв экспериментальных полей

Параметр	<i>n</i>	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Нижний квартиль	Верхний квартиль	Стандартное отклонение
Поле 1								
pH _{водн}	20	6,1	6,1	5,8	6,6	5,8	6,2	0,3
C _{орг} , %	120	1,5	1,5	1,3	1,7	1,4	1,7	0,2
N _{общ} , %	20	0,14	0,15	0,10	0,17	0,12	0,16	0,02
*P ₂ O ₅	20	116,8	115,5	73,00	185,0	92,00	132,0	32,3
*K ₂ O	20	80,7	80,0	55,0	123	72,0	91,0	19,5
*N-NH ₄	20	5,0	4,7	4,3	6,7	4,5	5,3	0,8
*N-NO ₃	20	<2,8	–	–	–	–	–	–
Поле 2								
pH _{водн}	20	5,8	5,7	5,3	6,5	5,6	6,0	0,3
C _{орг} , %	20	1,7	1,7	1,3	2,1	1,6	1,9	0,2
N _{общ} , %	20	0,15	0,14	0,10	0,21	0,12	0,17	0,03
*P ₂ O ₅	20	145,0	112,0	48,90	455,0	75,50	180,0	105,2
*K ₂ O	20	72,8	75,5	41,1	115	61,5	82,0	18,8
*N-NH ₄	20	5,9	5,2	3,5	15,9	4,8	5,9	2,7
*N-NO ₃	20	<2,8	–	–	–	–	–	–

Примечание.

* Агрохимические показатели гумусового горизонта почв представлены в мг/кг.

Пространственное распределение содержания гумуса хорошо отражают локальные особенности почв Полей. Так, для почв Поля 2 характерны большие величины в нижней части (южной), что хорошо согласуется с отмеченным выше вкладом эрозионных процессов (смывом верхнего горизонта), а также наличием в этой части Поля 2 остатков культурного слоя (с высоким содержанием гумуса) (рис. 6).

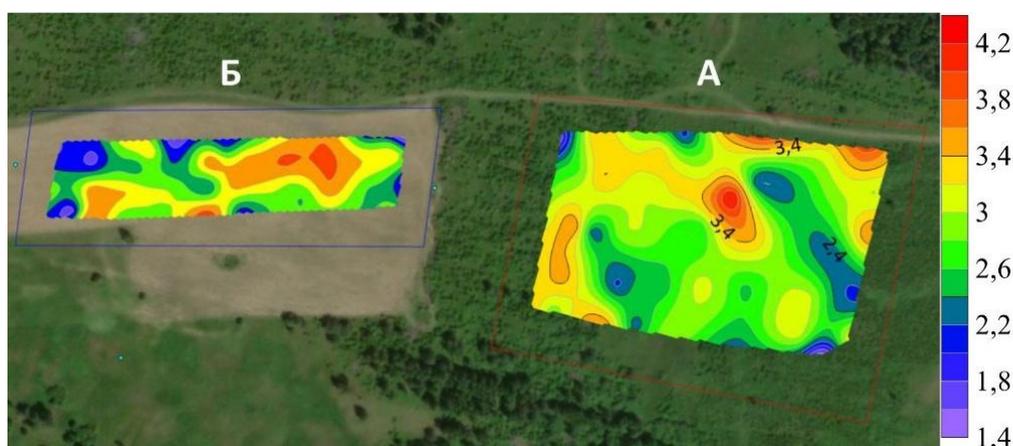


Рисунок 6. Стартовое содержание гумуса (%) в почвах Поля 1 (А) и Поля 2 (Б), октябрь 2023 г.

Полученные предварительные результаты позволяют оценить стартовые запасы углерода в почвах экспериментальных участков полигона. Они составляют в слое 0–20 см 41,3 т/га для Поля 1 и 38,3 т/га для Поля 2. В целом, полученные данные показали, что, согласно грациям (Орлов, 1985), содержание органического вещества в почвах обоих полей низкое (табл. 3). Согласно грациям (Прожорина, Затулей, 2009), почвы гумусовых горизонтов обоих полей относятся к слабокислым ($pH_{\text{водн}}$ 5,5–6,5). Показатели содержания валового азота в почвах Поля 1 и 2 соответствуют средним значениям для дерново-подзолистых почв согласно грациям, описанным в работе (Минеев, 2006).

Для изученных почв обнаружена высокая неоднородность по содержанию доступного фосфора в почвах Поля 2. Вариабельность содержания доступного фосфора составляет от 40 мг/кг, что соответствует низкому уровню обеспеченности, до 250 мг/кг – что находится на границе очень высокой обеспеченности. Почвы Поля 1 более однородны по этому показателю; в почвах Поля 1 его содержание изменяется от 84 до 148 мг/кг почвы, что соответствует средним значениям обеспеченности. Значения содержания подвижного калия в почве Поля 1 распределены равномерно и соответствуют нижней границе средней обеспеченности по этому свойству. Для почв Поля 2 содержание подвижного калия изменяется сильнее – от 54 до 90 мг/кг, однако эти показатели укладываются в грацию средней обеспеченности (Ягодин, 1989). Таким образом, дерново-подзолистая почва экспериментальных полей характеризуется средней степенью обеспеченности питательными веществами с высокой степенью неоднородности.

Гидротермические показатели и биологическая активность почв на старте эксперимента.

Контрольное (стартовое) изучение биологической активности почв проведено в конце мая 2024 года, через 2 недели после подготовки Поля 1 к посеву (вспашка и боронование в два следа) и разбивки поля на опытные делянки. На Поле 1 (вегетационный опыт) в этот момент растительный покров полностью отсутствовал, на других участках растительный покров был хорошо развит. К концу мая температура верхнего горизонта почвы была выше 20°C на большей части полигона, средние значения 21,9±3,1°C ($n=150$). По результатам дисперсионного анализа значимо по температуре отличался только экспериментальный участок Поле 1_клевер существенно более низкими температурами по сравнению с другими участками (рис. 7), что очевидно связано с затенением поверхности почвы посадками клевера (2023 года) и близкорасположенным лесным массивом. Исходя из значений объемной влажности, средние значения которой составили 11,0±4,1% ($n=150$), можно констатировать, что в этот период влагообеспеченность почвы была низкой. Значимо отличается от других только экспериментальный участок Поле 2_клевер минимальными значениями влажности. Средняя величина эмиссии CO₂ участков с растительностью и без составила 155±80 мг С/(м²·ч) ($n=150$), что соответствует значениям в пик вегетационного сезона для подобных экосистем (Лопес де Гереню и др., 2018). Данное обстоятельство обусловлено высокими температурами почв и воздуха в период измерений (конец мая) и теплой весной в целом. По величине эмиссии объекты значимо разделяются на участки без растительности и с посадками клевера и трав (рис. 7).

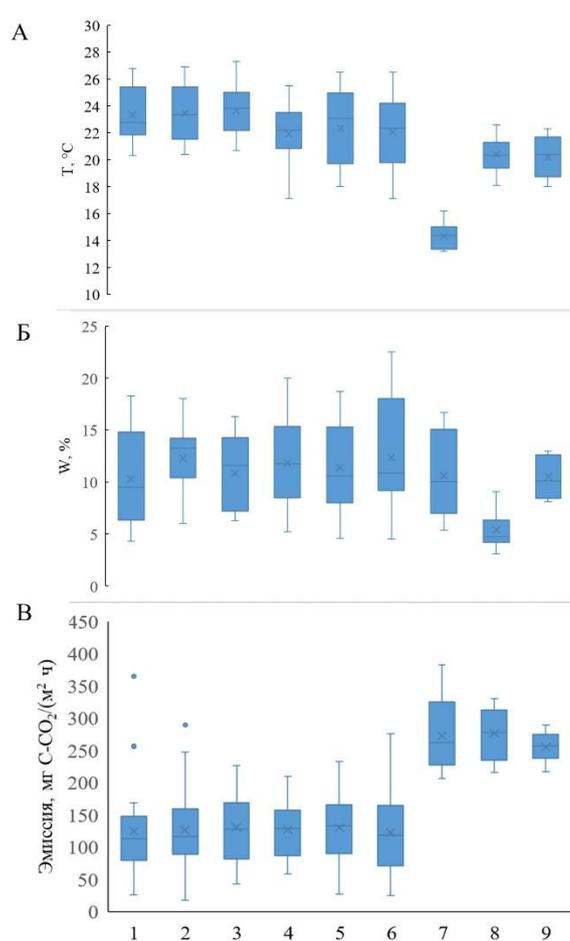


Рисунок 7. Температура (А), объемная влажность почв (Б) и эмиссия CO_2 (В) с поверхности почв экспериментальных участков. Показаны средние, медианы, межквартильный размах, минимум, максимум и выбросы. Варианты опыта Поля 1: 1 – многолетние злаковые травы + клевер, 2 – многолетние злаковые травы, 3 – эспарцет, 4 – залежь, 5 – многолетние злаковые травы + люцерна, 6 – пар, 7 – клевер, Поля 2: 8 – многолетние злаковые травы + клевер, 9 – многолетние злаковые травы.

Рассмотрим варьирование показателей на участке полевого опыта Поля 1. Температура поверхности почв в дни измерений (конец мая) изменялась на всей экспериментальной площади в очень широких пределах, разница между минимальной и максимальной температурой составила почти 10°C (табл. 4). Несмотря на большой разброс температуры почвы, в целом варьирование данного параметра невысокое, о чем свидетельствует низкий коэффициент вариации (табл. 4). Существенно сильнее изменяется объемная влажность почвы, а максимальная вариабельность установлена для величины эмиссии CO_2 .

Таблица 4

Гидротермические параметры и эмиссия CO_2 с поверхности почв экспериментальных участков Поля 1 и Поля 2

Параметр	<i>n</i>	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации
Т почвы, $^\circ\text{C}$	120	22,8	22,8	17,1	27,3	2,3	10
Влажность почвы, %	120	11,5	11,4	4,3	22,5	4,1	36
Эмиссия CO_2 , мг C/($\text{м}^2 \cdot \text{ч}$)	120	127	120	17	364	60	47

По результатам дисперсионного анализа можно констатировать, что в весенний период, до посева культур, делянки шести вариантов закладываемого полевого опыта на Поле 1 не различались значимо по таким показателям как температура и влажность почвы, эмиссия CO_2 . Колебания средних

значений температуры между вариантами опыта составляет 1–2°C, влажности – 1%, эмиссии – 1–8 мг С/(м²·ч), т.е. крайне малы. Данное обстоятельство считаем чрезвычайно важным, т.к. можно предположить, что изменения в параметрах в ходе будущего опыта будут определяться исключительно различиями агротехнических мероприятий и влиянием культур, а не природным варьированием почвенных свойств. Величину эмиссии СО₂ с поверхности почвы распаханых участков Поля 1, вероятно, можно принять за фоновое значение почвенного гетеротрофного дыхания (без вклада автотрофного дыхания корневых систем) при данных условиях. Вклад корневого дыхания, рассчитанный нами исходя из полученных данных, составляет чуть больше 50%.

Проведенный корреляционный анализ (отдельно для опыта 2024 г. без растительности, $n=120$ и с посадками 2023 года, $n=30$) выявил слабую значимую связь величины эмиссии с температурой для участков без растительности и слабую незначимую положительную связь эмиссии с влажностью для участков с растительностью; небольшая корреляционная связь объясняется невысокой вариабельностью свойств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, к лету 2024 года на карбоновом полигоне «Покровский» имеется четыре экспериментальных участка, располагающихся на двух полях. Три участка организованы в начале 2023 года: монодоминантная посадка клевера лугового (Поле 1_клевер), смесь многолетних злаковых культур и клевера лугового (Поле 2_клевер) и многолетние злаковые культуры (Поле 2_травы). На четвёртом участке в конце весны 2024 года заложен однофакторный полевой деляночный опыт с многолетними бобово-злаковыми смесями (6 вариантов). Подбор культур для вегетационного опыта осуществлялся с учетом их физиологических особенностей и влияния на секвестрацию углерода почвами.

Площадные морфологические и химические исследования свойств почв полей показали их идентичность (отсутствие статистически значимых отличий) по содержанию гумуса и агрохимическим показателям в начальный момент эксперимента, несмотря на широкое варьирование свойств. Агродерново-подзолистые почвы экспериментальных полей характеризуются низкими запасами гумуса и средней степенью обеспеченности питательными элементами с высокой степенью варьирования показателей. Запасы углерода в слое 0–20 см составляют 41,3 т/га для Поля 1 и 38,3 т/га для Поля 2. Установлено, что в весенний период, до посева культур, повторности закладываемого полевого опыта не различались значимо по таким показателям как температура и влажность почвы, эмиссия СО₂. Идентичности удалось достичь за счет случайного расположения повторностей опыта и ориентацией участков с учетом неоднородности полей, обусловленной историей землепользования и особенностями рельефа. Можно предположить, что изменения в параметрах углеродного цикла в ходе опыта будут определяться исключительно различиями агротехнических мероприятий и влиянием культур, а не природным варьированием почвенных свойств. За счет наличия разновозрастных посевов был оценен вклад корневого дыхания в эмиссию СО₂, который составил около 50% на пике вегетации для злаковых смесей и бобовых культур. В дальнейших исследованиях планируется мониторинг запасов почвенного углерода, а также круглогодичная оценка таких параметров углеродного цикла как почвенное дыхание, экосистемное дыхание, запас надземной и подземной фитомассы и другие.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны руководителю проекта «Карбоновый полигон «Покровский» НИУ ВШЭ» А.Ю. Иванову за организационную поддержку при проведении исследований, критические замечания, высказанные при подготовке статьи к печати.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена за счет средств субсидий Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на выполнение государственного задания НИУ ВШЭ в рамках «Программы создания и функционирования карбонового полигона в Калужской, Московской и Кировской областях».

ЛИТЕРАТУРА

Бахмет О.Н., Евстратова Л.П., Николаева Е.В., Канцерова Л.В., Дубина-Чехович Е.В. Оценка растительного покрова при анализе бюджета углерода в агроландшафтах Карелии // Вестник российской сельскохозяйственной науки. 2023. № 6. С. 55–60. <https://doi.org/10.31857/2500-2082/2023/6/55-60>

- Биоразнообразие биомов России. Равнинные биомы / Огуреева Г.Н., Леонова Н.Б., Микляева И.М., Бочарников М.В., Федосов В.Э., Мучник Е.Э., Урбанавичюс Г.П., Емельянова Л.Г., Хляп Л.А., Румянцев В.Ю., Кузиков И.В., Липка О.Н., Архипова М.В., Булдакова Е.В., Кадетов Н.Г. / Под ред. Г.Н. Огуреевой. Москва: ФГБУ «ИГКЭ», 2020. 623 с.
- Битва за климат: карбоновое земледелие как ставка России. Экспертный доклад / Под ред. А.Ю. Иванова, Н.Д. Дурманова. Москва: Изд. дом Высшей школы экономики, 2021. 120 с. <https://doi.org/10.17323/978-5-7598-2519-7>
- Бобровский М.В. Государственный природный заповедник Калужские засеки // Почвы заповедников и национальных парков Российской Федерации. Москва: НИИ-Природа – Фонд Инфосфера, 2012. С. 105–107.
- Геологическая карта четвертичных отложений Калужской области. Масштаб 1:500000. Министерство природных ресурсов Российской Федерации, Центральный региональный геологический центр, межрегиональный центр по геологической картографии, 1998.
- Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. Москва: Агропромиздат, 1985. 351 с.
- Карбоновые полигоны. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. 2021. [Электронный ресурс]. URL: https://minobrnauki.gov.ru/action/poligony/index.php?sphrase_id=108077 (дата обращения 07.02.2022).
- Качинский Н.А. Физика почв. Москва: Высшая школа, 1965. Том 1. 323 с.
- Классификация и диагностика почв России / Авторы и составители: Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Кудяров В.Н. Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1049–1060. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090087>
- Кудяров В.Н. Секвестрация углерода в почве: факты и проблемы (аналитический обзор) // Успехи современной биологии. 2022. Том 142. № 6. С. 545–559. <https://doi.org/10.31857/S0042132422060047>
- Кудяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А., Борисов А.В., Воронин П.Ю., Демкин В.А., Демкина Т.С., Евдокимов И.В., Залодчиков Д.Г., Карелин Д.В., Комаров А.С., Курганова И.Н., Ларионова, А.А., Лопес де Греню В.О., Уткин А.И. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. Москва: Наука, 2007. 315 с.
- Лопес де Гереню В.О., Курганова И.Н., Хорошаев Д.А. Влияние контрастных режимов увлажнения на эмиссию CO₂ из серой лесной почвы под сеяным лугом и чистым паром // Почвоведение. 2018. № 10. С. 1244–1258. <https://doi.org/10.1134/S0032180X18100039>
- Минеев В.Г. Агрохимия. Москва: МГУ, 2006. 720 с.
- Орлов Д.С. Химия почв. Москва: МГУ, 1985. 376 с.
- Прожорина Т.И., Затулей Е.Д. Химический анализ почв. Часть 2. Москва: Издательско-полиграфический центр МГУ, 2009. 30 с.
- Пуртова Л.Н., Тимофеева Я.О. Содержание, запасы гумуса и биологическая активность агротемногумусовых подбелов Приморского края // Плодородие. 2024. № 4(139). С. 64–67. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2024.139.14>
- Разработки российских ученых помогают развивать карбоновые полигоны. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. 2022. [Электронный ресурс]. URL: <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/nauka/57285/> (дата обращения 18.04.2025).
- Розанов Б.Г. Морфология почв: учебник для высшей школы. Москва: Академический проект, 2004. 432 с.
- Семенов В.М., Когут Б.М. Почвенное органическое вещество. Москва: ГЕОС, 2015. 233 с.
- Смагин А.В. Газовая фаза почв. Москва: МГУ, 2005. 301 с.
- Соколов М.С., Глинушкин А.П., Спиридонов Ю.Я., Торопова Е.Ю., Филипчук О.Д. Технологические особенности почвозащитного ресурсосберегающего земледелия (в развитие концепции ФАО) // Агрохимия. 2019. № 5. С. 3–20. <https://doi.org/10.1134/S000218811905003X>
- Сычев В.Г., Налиухин А.Н. Изучение потоков углерода и азота в длительных полевых опытах геосети с целью снижения выбросов парниковых газов и повышения депонирования диоксида углерода агроценозами // Плодородие. 2021. № 6(123). С. 38–41. <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.123.10>
- Теории и методы физики почв / Шеин Е.В., Карпачевский Л.О., Архангельская Т.А., Банников М.В. и др.; отв. ред. Е.В. Шеин и Л.О. Карпачевский. Москва: «Гриф и К», 2007. 616 с.

Шмелева Н.В. Роль нетрадиционных кормовых культур в воспроизводстве и повышении плодородия дерново-подзолистых почв Верхневолжья // Владимирский земледелец. 2021. № 2(96). С. 47–52. <https://doi.org/10.24412/2225-2584-2021-2-47-52>

Эседуллаев С.Т. Формирование травостоев на основе люцерны изменчивой на дерново-подзолистых почвах Верхневолжья // Зернобобовые и крупяные культуры. 2017. № 2(22). С. 121–126.

Ягодин Б.А. Агрохимия Москва: Агропромиздат, 1989. 639 с.

Paul E.A., Kravchenko A., Grandy A.S., Morris S. Soil organic matter dynamics: Controls and management for sustainable ecosystem functioning / S.K. Hamilton, J.E. Doll, G.P. Robertson (Eds). The Ecology of Agricultural Landscapes: Long-Term Research on the Path to Sustainability. New York: Oxford University Press, 2015. P. 104–134.

IUSS Working Group WRB. 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, 2022. 236 p.

Поступила в редакцию 27.06.2025

Принята 08.09.2025

Опубликована 19.09.2025

Сведения об авторах:

Матышак Георгий Валерьевич – кандидат биологических наук, эксперт, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Центр технологического трансфера (Москва, Россия); matyshak@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-6428-9639>

Архипова Мария Владимировна – кандидат географических наук, эксперт, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Центр технологического трансфера (Москва, Россия); masha-a@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6196-8398>

Дурманов Николай Дмитриевич – заместитель директора Центра технологического трансфера ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия), durmanov@postman.ru; <https://orcid.org/0009-0008-6622-7271>

Гончарова Ольга Юрьевна – кандидат биологических наук, эксперт, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Центр технологического трансфера (Москва, Россия); goncharovaou@my.msu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1099-251X>

Кондрашкина Марина Иосифовна – кандидат биологических наук, доцент, эксперт, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Центр технологического трансфера (Москва, Россия); kondra_mar@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7180-5119>

Корденков Сергей Николаевич – заместитель директора Центра технологического трансфера ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (Москва, Россия); Skordenkov@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0004-3490-5286>

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Carbon polygon (test site) "Pokrovsky": methodological aspects of setting up a field experiment to assess the impact of perennial forage grasses on carbon sequestration by soils of agroecosystems

© 2025 G. V. Matyshak , M. V. Arkhipova , N. D. Durmanov , O. Ju. Goncharova , M. I. Kondrashkina , S. N. Kordenkov 

National Research University Higher School of Economics, Myasnitskaya st., building 20b, Moscow, Russia. E-mail: matyshak@gmail.com

The aim of the study was to assess the main characteristics of the land use history and soil properties of fallow areas allocated for experimental plots at the “Pokrovsky” carbon test site and justify of the methodology for arranging a field experiment.

Location and time of the study. The study was conducted in the experimental fields of the “Pokrovsky” test site, located in the center of the East European Plain, on the border of the Smolensk and Kaluga regions in the middle reaches of the Ugra River in 2023–2024.

Methods. The study involved description of the of land use history based on historical cartographic materials, detailed mapping of the soil cover of the site, assessing the chemical, physical, agrochemical properties of soils using common methods, as well as assessing their biological activity by measuring CO₂ emissions from the soil surface using the chamber method.

Results. Agricultural sod-podzolic soils of the experimental fields were characterized by low humus storage and an average nutrient supply with high degree variation. Carbon storage in the 20 cm layer was 38,3 and 41,3 t/ha for the two experimental fields, used in the study. It was found that in spring, before sowing crops, the soil replicates in both experimental field did not differ significantly in such indicators as temperature, moisture, CO₂ emission. The contribution of root respiration to CO₂ emission was about 50% at the peak of vegetation for cereal mixtures and legumes.

Conclusions. By the summer of 2024 the “Pokrovsky” carbon test site had four experimental plots located on two fields. Three plots were set up at the beginning of 2023: monodominant planting of red clover, a mixture of perennial cereal crops and red clover, and perennial cereal crops. At the fourth site, at the end of spring 2024, a single-factor field plot experiment was established with perennial legume-cereal mixtures selected taking into account their physiological characteristics and impact on carbon sequestration, on plots identical in chemical and biological properties.

Keywords: sod-podzolic soils; carbon polygon; field plot experiment; ground cover crops; carbon sequestration; CO₂ emission.

How to cite: Matyshak G.V., Arkhipova M.V., Durmanov N.D., Goncharova O.Ju., Kondrashkina M.I., Kordenkov S.N. Carbon polygon (test site) “Pokrovsky”: methodological aspects of setting up a field experiment to assess the impact of perennial forage grasses on carbon sequestration by soils of agroecosystems. 2025. 8(3). e318. DOI: [10.31251/pos.v8i3.318](https://doi.org/10.31251/pos.v8i3.318) (in Russian with English abstract).

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to the head of the project “Pokrovsky Carbon Test Site of the National Research University Higher School of Economics” A.Yu. Ivanov for organizational support during the research and critical comments made during the preparation of the article for publication.

FUNDING

The work was carried out using subsidies from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the implementation of a state assignment to the National Research University Higher School of Economics within the framework of the “Program for the creation and operation of a carbon testing ground in the Kaluga, Moscow and Kirov regions.”

REFERENCES

- Bakhmet O.N., Evstratova L.P., Nikolaeva E.V., Kantserova L.V., Dubina-Chekhovich E.V. Assessment of vegetation cover when analyzing the carbon budget in agricultural landscapes of Karelia. Vestnik of the Russian agricultural sciences. 2023. No. 6. P. 55–60. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/2500-2082/2023/6/55-60>
- Biodiversity of biomes in Russia. Plain biomes / Ogureeva G.N., Leonova N.B., Miklyaeva I.M., Bocharnikov M.V., Fedosov V.E., Muchnik E.E, Urbanavichyus G.P., Emel yanova L.G., Khlyap L.A., Rummyantsev V.Yu., Kuzikov I.V., Lipka O.N., Arkhipova M.V., Buldakova E.V., Kadetov N.G. / Ed. G.N. Ogureeva. Moscow: FGBU «IGKE», 2020. 623 p. (in Russian).
- Battle for the Climate: Carbon Farming as Russia's Bet. Expert Report / Edited by A.Y. Ivanova, N.D. Durmanova. Moscow: Publishing house of the Higher School of Economics, 2021. 120 p. (in Russian). <https://doi.org/10.17323/978-5-7598-2519-7>
- Bobrovsky M.V. State Nature Reserve Kaluga Zaseki. In book: Soils of Nature Reserves and National Parks of the Russian Federation. Moscow: NIA-Priroda – Infosfera Fund, 2012. P. 105–107. (in Russian).
- Geological map of Quaternary deposits of the Kaluga region. Scale 1:500000. Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, Central Regional Geological Center, Interregional Center for Geological Cartography, 1998. (in Russian).

- Dospekhov B.A. Methods of field experiment. Moscow: Agropromizdat, 1985. 351 p. (in Russian).
- Carbon polygons. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. 2021. [Electronic resource]. URL: https://minobrnauki.gov.ru/action/poligony/index.php?sphrase_id=108077 (accessed on 07.02.2022). (in Russian).
- Kachinsky N.A. Physics of soils. Moscow: Higher School, 1965. Vol. 1. 323 p. (in Russian).
- Classification and diagnostics of soils of Russian / Authors and compilers: L.L. Shishov, V.D. Tonkonogov, I.I. Lebedeva, M.I. Gerasimov. Smolensk: Oykumena Publ., 2004. 342 p. (in Russian).
- Kudeyarov V.N. Current state of the carbon budget and the capacity of Russian soils for carbon sequestration. Eurasian Soil Science. 2015. Vol. 48. No. 9. P. 923–933. <https://doi.org/10.1134/S1064229315090070>
- Kudeyarov V.N. Soil Carbon Sequestration: Facts and Challenges (Analytical Review). Uspehi sovremennoj biologii. 2022. Vol. 142. No. 6. P. 545–559. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0042132422060047>
- Kudeyarov V.N., Zavarzin G.A., Blagodatsky S.A., Borisov A.V., Voronin P.Yu., Demkin V.A., Demkina T.S., Evdokimov I.V., Zamolodchikov D.G., Karelin D.V., Komarov A.S., Kurganova I.N., Larionova A.A., Lopes de Grenu V.O., Utkin A.I. Pools and Flows of Carbon in Terrestrial Ecosystems of Russia. Moscow: Nauka Publ., 2007. 315 p. (in Russian).
- Lopes de Gerenyu V.O., Kurganova I.N., Khoroshaev D.A. The Effect of Contrasting Moistening Regimes on CO₂ Emission from the Gray Forest Soil under a Grass Vegetation and Bare Fallow. Eurasian Soil Science. 2018. Vol. 51. No. 10. P. 1200–1213. <https://doi.org/10.1134/S1064229318100034>
- Mineev V.G. Agrochemistry. Moscow: Moscow State University, 2006. 720 p. (in Russian).
- Orlov D.S. Chemistry of soils. Moscow: Moscow State University, 1985. 376 p. (in Russian).
- Prozhorina T.I., Zatul'ei E.D. Chemical analysis of soils. Part 2. Moscow: Publishing and Printing Center of Moscow State University, 2009. 30 p. (in Russian).
- Purtova L.N., Timofeeva Y.O. The humus content, reserve of humus and biological activity of planosols from Primorskii Region under the phytomeliorative experiment. Plodorodie. 2024. No. 4(139). P. 64–67. (in Russian). <https://doi.org/10.25680/S19948603.2024.139.14>
- Russian scientists' developments help expand carbon polygons Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. 2025. [Electronic resource]. URL: <https://minobrnauki.gov.ru/press-center/news/nauka/57285/> (accessed on 18.04.2025). (in Russian).
- Rozanov B.G. Morphology of soils: a textbook for higher school. Moscow: Akademicheskii proekt Publ., 2004. 432 p. (in Russian).
- Semenov V.M., Kogut B.M. Soil organic matter. Moscow: GEOS, 2015. 233 p. (in Russian).
- Smagin A.V. Gas phase of soils. Moscow: Moscow State University, 2005. 301 p. (in Russian).
- Sokolov M.S., Glinushkin A.P., Spiridonov Yu.Ya., Toropova E.Yu., Filipchuk O.D. Technological Features of Soil-Protecting Resource-Saving Agriculture (in Development of the FAO Concept). Agrokhimia. 2019. No 5. P. 3–20. (in Russian). <https://doi.org/10.1134/S000218811905003X>
- Sychev V.G., Naliukhin A.N. Study of flows of carbon and nitrogen in long-term field experiments of the geoset with the purpose of reducing greenhouse gas emissions and increasing the deposition of carbon dioxide by agrocenoses. Plodorodie. 2021. No. 6(123). P. 38–41. (in Russian). <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.123.10>
- Theories and Methods of Soil Physics / Shein E.V., Karpachevsky L.O., Arkhangelskaya T.A., Bannikov M.V. et al.; Holes. eds. by E.V. Shein and L.O. Karpachevsky. Moscow: Grif i K, 2007. 616 p. (in Russian).
- Shmeleva N.V. Role of unconventional fodder crops to restore and increase the fertility of soddy-podzolic soil of upper Volga. Vladimirskij zemledec. 2021. No. 2(96). P. 47–52. (in Russian). <https://doi.org/10.24412/2225-2584-2021-2-47-52>
- Esedullaev S.T. Formation of herbage on the basis of changeable alfalfa on sod-podzolic soils of the upper Volga Region. Legumes and great crops. 2017. No. 2(22). P. 121–126. (in Russian).
- Yagodin B.A. Agrokhimiya Moscow: Agropromizdat, 1989. 639 p. (in Russian).
- Paul E.A., Kravchenko A., Grandy A.S., Morris S. Soil organic matter dynamics: Controls and management for sustainable ecosystem functioning / S.K. Hamilton, J.E. Doll, G.P. Robertson (Eds). The Ecology of Agricultural Landscapes: Long-Term Research on the Path to Sustainability. New York: Oxford University Press, 2015. P. 104–134.

IUSS Working Group WRB. 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, 2022. 236 p.

Received 27 June 2025

Accepted 08 September 2025

Published 19 September 2025

About the authors:

Georgy V. Matyshak – Candidate of Biological Sciences, Expert, National Research University Higher School of Economics, Center for Technology Transfer (Moscow, Russia); matyshak@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0008-6428-9639>

Maria V. Arkhipova – Candidate of Geographical Sciences, Expert, National Research University Higher School of Economics, Center for Technology Transfer (Moscow, Russia); masha-a@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0001-6196-8398>

Nikolay D. Durmanov – Deputy Director of the Center for Technological Transfer of the National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia), durmanov@postman.ru; <https://orcid.org/0009-0008-6622-7271>

Olga Ju. Goncharova – Candidate of Biological Sciences, Expert, National Research University Higher School of Economics, Center for Technology Transfer (Moscow, Russia); goncharovaoy@my.msu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1099-251X>

Marina I. Kondrashkina – Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Expert, National Research University Higher School of Economics, Center for Technology Transfer (Moscow, Russia); kondra_mar@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-7180-5119>

Sergey N. Kordenkov – Deputy Director of the Center for Technological Transfer of the National Research University Higher School of Economics (Moscow, Russia); Skordenkov@yandex.ru; <https://orcid.org/0009-0004-3490-5286>

The authors read and approved the final manuscript



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)