

**ПИЛОТНЫЙ КАРБОНОВЫЙ ПОЛИГОН В РОССИИ: АНАЛИЗ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ И РАСТИТЕЛЬНОСТИ**

© 2022 И. Н. Курганова ^{1,2}, В. О. Лопес де Гереню ¹, С. Л. Ипп³, В. В. Каганов ⁴,
Д. А. Хорошаев ¹, Д. И. Рухович⁵, Ю. В. Сумин³, Н. Д. Дурманов³, Я. В. Кузяков ⁶

¹ФГБУН ФИЦ ПНЦБИ Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, ул. Институтская, 2а, г. Пушкино, 142290, Россия. E-mail: ikurg@mail.ru

²Тюменский государственный университет, ул. Володарского, 6, Тюмень, 625003, Россия

³ООО «Контролтугоу.Ру», ул. Шаболовка, д. 31, стр. 11, этаж 4, помещение 1-15, г. Москва, 115162, Россия

⁴ФГБУН Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14, г. Москва, 117997, Россия

⁵ФГБНУ Почвенный Институт им. В.В. Докучаева, Пыжевский пер., д. 7, стр. 2, г. Москва, 119017, Россия

⁶Университет Георга Августа, Бузгенвег, 2, г. Гёттинген, 37077, Германия

Цель исследования: характеристика почв и определение запасов углерода в лесной растительности на территории пилотного карбонового полигона «Угра».

Место и время проведения. Калужская область, Национальный парк Угра, март-октябрь 2020 г.

Методология. Исследования проводили на почвах разного землепользования: современная паашня, залежные почвы под луговой растительностью, молодые лесные участки 25–30-летнего возраста и смешанный лес (75–80 лет). Образцы почв отбирали из 4 прикопок и одного разреза, заложенных на 2–4 отдельных участках каждого типа землепользования из слоя 0–50 см с шагом 10 см. Определяли содержание общего углерода (С) и общего азота (N), отношение C/N. Поскольку в дерново-подзолистых почвах карбонаты отсутствуют, то содержание общего С можно принять равным содержанию органического С (С_{орг}). Учитывая плотность почвы, была выполнена оценка запасов С_{орг} и N в слоях 0–20 и 0–50 см. В слое 0–20 см определяли гранулометрический состав, величину рН(KCl), наименьшую влажёмкость образцов нарушенного сложения (НВ) и микробную активность (скорость базального дыхания, БД и содержание углерода микробной биомассы, С_{мик}). На лесных участках, на основе данных лесотаксационного учёта, были оценены запасы углерода в фитомассе и мортмассе (сухостой деревьев).

Основные результаты. Дерново-подзолистые почвы Карбонового полигона «Угра» характеризуются супесчаным гранулометрическим составом и слабокислой (паашня и залежи) или кислой (лесные участки) реакцией. Микробная активность почв в слое 0–20 см убывает в следующем ряду: залежь под луговой растительностью > 25–30-летние лесные насаждения > паашня > смешанный лес. Показано, что варьирование скорости БД на 86–90% определялось содержанием С_{мик} в почве. Максимальные запасы С_{орг} в слое 0–50 см характерны для почв паашни (65,4 ± 4,4 т С/га), а минимальные (41,4 ± 0,4 т С/га) – для почв 25–30-летних лесных участков. Соотношение C/N в слое 0–10 см изученных почв варьирует от 8,9 до 17,6 и зависит от состава растительного опада, поступающего на поверхность почвы. Основным пулом С в лесных экосистемах, независимо от их возраста, является фитомасса древесных растений. Её запасы в лесных насаждениях 25–30-летнего возраста и смешанного леса превосходят суммарные запасы С_{орг} в 50-см слое почв в 1,6 и 4 раза, соответственно. Общие запасы С в смешанном лесу в 3 раза выше, чем в древостоях 25–30-летнего возраста.

Заключение. Запасы С и состояние почв Карбонового полигона «Угра» зависят от типа современного землепользования, который, в свою очередь, определяет характер поступающих в почву растительных остатков. Это является причиной наиболее отчётливых различий изученных почв по содержанию С_{орг} и N, отношению C/N и микробным характеристикам почв. Возраст лесных насаждений является ключевым фактором, определяющим суммарные запасы С в почве и фитомассе.

Ключевые слова: карбоновый полигон; лесные и сельскохозяйственные земли; дерново-подзолистая почва; содержание углерода и азота; микробные свойства; запасы углерода в лесной растительности

Цитирование: Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Ипп 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. Том 5. № 2. e169. DOI: [10.31251/pos.v5i2.169](https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.169)

ВВЕДЕНИЕ

Глобальное изменение климата превратилось из узкоспециального естественнонаучного вопроса в одну из наиболее острых проблем мировой экономики и политики (Макаров, 2013). В индустриальную эпоху рост концентрации CO_2 в атмосфере приобрёл экспоненциальный характер и вызвал беспрецедентное увеличение глобальной температуры воздуха (Второй оценочный доклад по изменению климата..., 2014). Считается, что именно человек является причиной столь резких проявлений климатических изменений и, поэтому, именно человечеству необходимо искать пути для решения этой глобальной экологической проблемы современности и выработать стратегию по смягчению климатических изменений.

Одним из предлагаемых направлений для решения данного вопроса является сокращение выбросов парниковых газов в индустрии и агропромышленном комплексе путём перехода на «зелёную», или низкоуглеродную экономику и низкоэмиссионные технологии производств (Битва за климат..., 2021). Западные страны настаивают на введении трансграничного налога для стран-экспортёров продукции с высоким углеродным следом; уже к 2023 г. механизм налогообложения должен охватить электроэнергетику и продукцию энергоёмких секторов промышленности, производящих цемент, сталь, алюминий, нефтепродукты, бумагу, стекло, химикаты и удобрения.

Состояние сельскохозяйственных почв играет существенную роль не только в обеспечении продовольственной безопасности страны, но и в вопросах изменения климата (Kudeyarov, 2019). На протяжении веков «здоровые» почвы смягчали негативные последствия потепления климата, выступая постоянно действующим стоком атмосферного CO_2 (Иванов и др., 2021). Пул почвенного углерода, включая торфяные залежи, на территории Российской Федерации составляет 298–342 Гт С (1 Гт = 10^9 т) для слоя 0–100 см или 18–23% мировых запасов углерода в педосфере (Курганова, Кудеяров, 2012). Используя почву для получения продуктов питания, человек оказывает огромное влияние на почвенные запасы углерода, определяя тем самым экологическую функцию почв, как источника или стока CO_2 . Необходимо разработать и внедрить меры по связыванию избыточных количеств CO_2 с использованием адаптивных технологий, воспроизводящих естественные природные процессы. К таким мерам, прежде всего, следует отнести лесоразведение, а также регенеративное и ресурсосберегающее земледелие (Соколов и др., 2019). Поэтому сегодня как никогда актуальными становятся задачи мониторинга эмиссии и поглощения парниковых газов, оценки современного потенциала наземных экосистем депонировать углерод и разработка научно-обоснованных мер по увеличению углерод-поглощающей ёмкости основных резервуаров биогенного цикла углерода.

В связи с этим в современную государственную повестку дня включено создание в самые кратчайшие сроки так называемых «карбоновых полигонов» – территорий для исследования биогеохимического цикла углерода в наиболее типичных экосистемах и выработки практических мер по контролю эмиссии и поглощения основных парниковых газов. Проект Минобрнауки по созданию карбоновых полигонов на территории Российской Федерации стартовал в начале 2021 г. (Карбоновые полигоны..., 2021). Для научного обоснования проекта Минобрнауки, на год раньше – в марте 2020 г. – был запущен Пилотный Карбоновый полигон в Калужской области на территории Национального природного парка «Угра». Располагаясь на площади около 600 га, Карбоновый полигон «Угра» (КП «Угра») включает лесные и залежные земли разного возраста, типичные для зоны смешанных лесов, а также пахотные земли. Основная задача организации КП «Угра» – разработка и испытание технологий дистанционного и наземного контроля эмиссии парниковых газов и других значимых для изменения климата параметров на лесных территориях и сельскохозяйственных землях. Один из начальных этапов исследований на КП «Угра» включал инвентаризацию состояния почв и растительности.

В представляемой работе даётся: (1) общая характеристика почв лесных, залежных и пахотных участков и (2) оценка запасов углерода в почвах и фитомассе лесных участков Первого карбонового полигона, а также обсуждаются возможные перспективы научных исследований на Пилотном КП «Угра».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общая характеристика климата и растительности. Климат в регионе исследований умеренно-континентальный. По данным ближайшей к полигону метеостанции Сухиничи (Калужская область, 54°06' с.ш. 35°21' в.д.), среднегодовая температура воздуха (Тв) в 1981–2010

гг. составляла 5,4 °С, а среднегодовое количество осадков – 637 мм. Минимальная Тв характерна для января (–6,8 °С), а максимальная – для июля (18,3 °С). Преобладающий тип почв на КП «Угра», согласно данным рекогносцировочных маршрутов, дерново-подзолистая глубоко оглеенная супесчано-глинистая на флювиогляциальных отложениях (Классификация ..., 2004).

Преобладающим типом растительности на КП «Угра» (Рис. 1) являются лесные насаждения двух типов. Одни из них (площадки F4–F6) представляют собой смешанный лес, имеют разнородный породный состав, с преобладанием сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris*, L.) и берёзы повислой (*Betula pendula*, Roth). Их возраст составляет около 75–80 лет, что подтверждается наличием обследованных лесных массивов на исторических картах 1940–1945 гг. Другие (площадки F1–F3) представляют собой заросшие древесной растительностью земли сельхозназначения, выведенные из сельскохозяйственного оборота 25–30 лет назад. К настоящему моменту на них образовались сомкнутые древостои с преобладанием *B. pendula*, небольшим участием *P. sylvestris* и единичными экземплярами осины обыкновенной (*Populus tremula*, L.). Для проведения лесотаксационных работ на однородных ключевых участках в ненарушенных лесных насаждениях были организованы пробные площади размером 34×33 м (0,1 га).

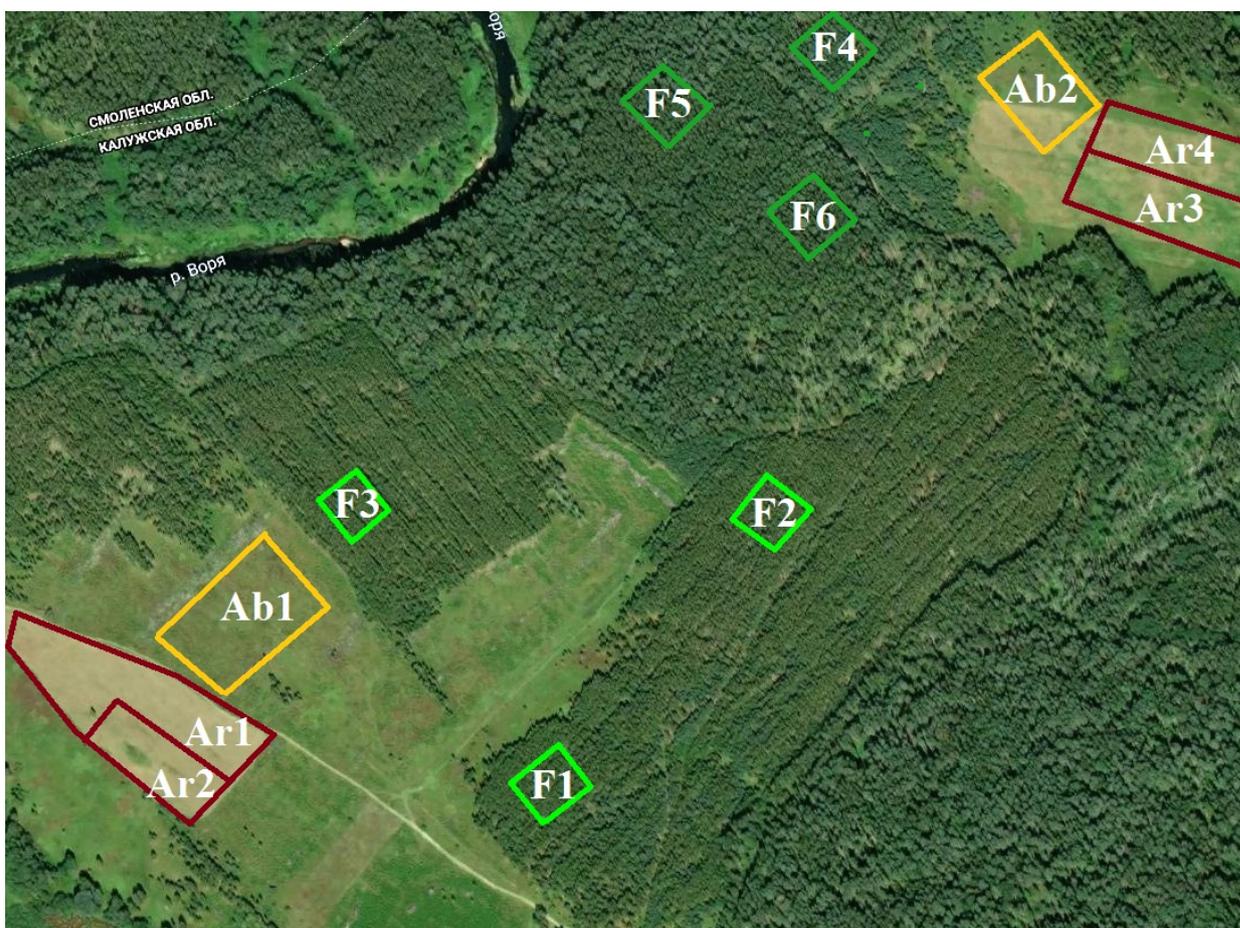


Рисунок 1. Расположение площадок исследования на территории Пилотного Карбонового полигона «Угра». Обозначения: F1–F3 – лесные насаждения 25–30 лет; F4–F6 – лесные насаждения 75–80 лет; Ar1–Ar4 – пахотные участки; Ab1–Ab2 – залежные участки под луговой растительностью.

На территории КП «Угра» располагаются также бывшие сельскохозяйственные земли, которые представляют собой луговые ценозы с разнотравно-злаковой растительностью (площадки Ab1 и Ab2). После выведения из сельскохозяйственного оборота они периодически распахивались, что препятствовало возобновлению на них древесной растительности. Современные пахотные участки (Ar1–Ar4) в начале 90-х годов прошлого столетия на несколько лет также были заброшены, но затем периодически пахались и использовались под выращивание самых разнообразных сельскохозяйственных культур.

Отбор почвенных проб и их анализ. На участках различного землепользования в углах квадрата со стороной 50 метров закладывали по 4 прикопки, а в центре квадрата был выкопан полнопрофильный разрез, в котором с помощью бура Качинского определяли плотность почвы (BD , г/см³) в 10-см слоях до глубины 50 см весовым методом (Шеин, 2005). Во всех прикопках и в разрезе послойно с шагом 10 см до глубины 50 см отбирали почвенные пробы. Образцы почв высушивали до воздушно-сухого состояния и просеивали через сито с диаметром ячеек 2 мм. Корни и грубодисперсный органический материал удаляли вручную. Гранулометрический состав определяли для каждого участка в смешанном образце из слоя 0–20 см методом пипетки с диспергацией пирофосфатом натрия (Шеин, 2005). В тех же образцах нарушенного сложения проводили определение наименьшей влагоёмкости (НВ) с использованием пластиковых трубочек диаметром 2 см с перфорированным дном (Шеин, 2005). Определение величины рН проводили в 1 М растворе KCl (соотношение почвы и раствора 1:2,5) на рН-метре Metler-Toledo (Швейцария).

Содержание общего углерода (С) и общего азота (N) определяли в индивидуальных образцах, отобранных послойно, на автоматическом элементном CHNS-O анализаторе (EA 1110, PerkinElmer) в независимой аккредитованной лаборатории Института Биологии Коми «Коми научный центр Уральского отделения Российской Академии наук» (РОСС RU.0001.511257, <http://fsa.gov.ru>). Поскольку в дерново-подзолистых почвах карбонаты отсутствуют, то содержание общего С можно принять равным содержанию органического С ($C_{орг}$). Для каждого из 12 участков было проанализировано по 20–25 почвенных образцов. Отношение C/N определяли на основе их массовой доли, т.е. $C(\%)/N(\%)$.

Запасы углерода (Stock $C_{орг}$, т С/га) в каждом 10-см слое исследуемых почв определяли по формуле:

$$\text{Stock } C_{орг} = \text{Content } C_{орг} \times BD \times h \quad (1),$$

где Content $C_{орг}$ – абсолютное среднее содержание $C_{орг}$ в слое (%), BD – плотность почвы (г/см³), h – мощность слоя, см. Суммарные запасы $C_{орг}$ в слоях 0–20 и 0–50 см находили простым суммированием запасов $C_{орг}$ в соответствующих 10-см слоях.

Базальное дыхание (БД) почв определяли в слое 0–20 см в 3-х кратной повторности по интенсивности выделения CO_2 из почвы после 7 дней предварительной инкубации при увлажнении, соответствующем 70–75% их НВ, и температуре 22–24 °С (Kurganova et al., 2012):

$$\text{БД (мг С/кг почвы/сут)} = (C_1 - C_0) \times 12 \times V_{\text{флак}} \times 1000 / m \times 22,4 \times t \times 100 \quad (2),$$

где C_0 и C_1 – начальная и конечная концентрации CO_2 во флаконе, объёмные %; $V_{\text{флак}}$ – объём флакона, мл; t – время инкубации, сут; m – навеска почвы, кг; 12 – атомный вес углерода, г; 22,4 – молярный объём, л.

Содержание углерода микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$) определяли методом субстрат-индуцированного дыхания (Anderson, Domsch, 1978) в почвенных образцах после измерения БД и внесения 1 мл раствора глюкозы из расчёта 10 мг глюкозы на 1 г почвы. Скорость субстрат-индуцированного дыхания ($V_{\text{сид}}$) рассчитывали по формуле (2), выражая в мкл CO_2 /г почвы/час. Содержание $C_{\text{мик}}$ (мг С/кг почвы) рассчитывали по формуле (Anderson, Domsch, 1978):

$$C_{\text{мик}} = 40,04 \times V_{\text{сид}} + 0,37 \quad (3).$$

Определение запасов стволовой древесины и оценка общих запасов углерода в фитомассе и мортмассе базировалось на данных сплошной перечислительной таксации древостоя в пределах организованных пробных площадей (ПП), выполненной согласно Общесоюзным нормативам для таксации лесов (1989). К учёту принимались деревья с диаметром ствола 8 и более см, для каждого из которых определяли породу и выполняли двукратное измерение диаметра (в см) на высоте 1,3 м с использованием таксационной вилки Mantax-80. Измерение высот проводили ультразвуковым высотомером VERTEX-IV для выборки, охватывающей 15–30% деревьев каждой породы. Запас стволовой древесины вычисляли по формуле:

$$M = \Sigma G \times H_{\text{ср}} \times F_{\text{ср}} \quad (4),$$

где M – объём стволовой древесины, м³/га; ΣG – сумма площадей сечения элемента леса (породы), м²/га; $H_{\text{ср}}$ – средняя высота элемента леса (породы), м; $F_{\text{ср}}$ – среднее видовое число

элемента леса (породы), представляющее табличную величину, которая варьирует в диапазоне от 0,4 до 0,5. Величина ошибки при определении запаса стволовой древесины по данным пробных площадей со сплошным перечётом элементов древостоя находится в диапазоне от 2 до 10%.

Конвертирование полученных таксационных показателей в величины, отражающие запас углерода, депонированного в фитомассе деревьев (стволы, ветви, листья, корни), было выполнено на основе Руководящих указаний Межправительственной группы экспертов по изменению климата и Методических указаний по количественному определению объёма поглощения парниковых газов (2017), утверждённых распоряжением Минприроды России № 20-Р от 30.06.2017.

Запас углерода в фитомассе ($C_{\text{фито}}$, т С/га) рассчитывали по формуле:

$$C_{\text{фито}} = M \times \text{КР} \quad (5),$$

где M – объём стволовой древесины, м³/га; КР – конверсионный коэффициент для пересчёта запаса стволовой древесины в углерод фитомассы (табл. 1).

Таблица 1

Конверсионные коэффициенты для расчёта запасов углерода в фитомассе древостоя по объёмному запасу древесины

Преобладающая порода	Группа возраста			
	молодняки	средне-возрастные	приспевающие	спелые и перестойные
<i>B. pendula</i>	0,437	0,396	0,367	0,367
<i>P. sylvestris</i>	0,435	0,352	0,329	0,356
<i>P. tremula</i>	0,356	0,363	0,335	0,365

Обработка данных. Статистическую обработку результатов и визуализацию данных проводили с использованием программы Microsoft Excel 2013 (пакет «Анализ данных») и Statistica 6. В таблицах и на графиках приведены средние значения и стандартная ошибка (SE). Все статистические процедуры выполняли при уровне значимости $\alpha = 5\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристика свойств почв лесных участков. Дерново-подзолистые почвы Карбонового полигона «Угра» сформировались на флювиогляциальных отложениях. На всех лесных участках они характеризуются близким гранулометрическим составом (табл. 2). В слое 0–20 см преобладающими являются фракции песка (< 0,05 мм; 51–60%) и крупной пыли (0,05–0,01 мм; 22–29%). Содержание физической глины (< 0,01 мм) в верхнем горизонте почв изменяется в пределах 10–20%, и в соответствии с классификацией Н.А. Качинского, все почвы, независимо от возраста сформировавшегося на них древостоя, относятся к супесчаным.

Таблица 2

Гранулометрический состав почв лесных участков Карбонового полигона «Угра» (слой 0–20 см)

Объект	Фракции (мм), %						Физ. глина < 0,01	Физ. песок > 0,01
	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	< 0,001		
Лесные участки (возраст 25–30 лет)								
F1	35,90	16,47	28,33	6,11	9,75	3,44	19,30	80,70
F2	37,63	13,45	29,52	6,27	9,26	3,88	19,41	80,59
F3	36,12	18,14	27,77	1,54	14,17	2,27	17,97	82,03
Смешанный лес (возраст 75–80 лет)								
F4	44,81	19,19	21,56	4,60	6,52	3,32	14,44	85,56
F5	38,88	21,92	22,84	5,72	7,04	3,60	16,36	83,64
F6	32,32	26,72	24,72	4,88	7,24	4,12	16,24	83,76

Величина НВ в слое 0–20 см почв под более молодыми лесными насаждениями варьирует незначительно – от 33 до 34%, составляя в среднем (\pm SE) $33,3 \pm 0,4\%$ (табл. 3). В почвах смешанного леса величины НВ значимо выше ($p < 0,001$), чем в почвах молодых насаждений и

составляют 37–40% (среднее значение (\pm SE) – $38,2 \pm 0,9\%$), что при сходном гранулометрическом составе почв всех лесных участков может быть обусловлено более высоким содержанием органического вещества (ОВ) в почвах смешанного леса (рис. 1).

Таблица 3

Наименьшая влагоёмкость (НВ), базальное дыхание (БД) и содержание микробного углерода ($C_{\text{мик}}$) в почвах лесных участков Карбонового полигона «Угра» (слой 0–20 см)

Участок	pH(KCl)	НВ, %	БД, мг С/кг почвы/сут	$C_{\text{мик}}$, мг С/кг почвы
Лесные участки (возраст 25–30 лет)				
F1	$4,00 \pm 0,02$	$32,8 \pm 0,44$	$32,4 \pm 0,7$	471 ± 17
F2	$3,95 \pm 0,03$	$34,1 \pm 0,67$	$28,2 \pm 1,4$	379 ± 21
F3	$4,22 \pm 0,04$	$33,1 \pm 0,08$	$22,9 \pm 0,5$	319 ± 4
Среднее	$4,05 \pm 0,08$	$33,3 \pm 0,4$	$27,8 \pm 2,7$	390 ± 44
Смешанный лес (возраст 75–80 лет)				
F4	$3,87 \pm 0,03$	$37,6 \pm 0,05$	$15,4 \pm 0,3$	$180 \pm 1,8$
F5	$3,88 \pm 0,01$	$37,0 \pm 0,26$	$10,6 \pm 0,5$	$182 \pm 5,5$
F6	$3,97 \pm 0,01$	$40,0 \pm 2,42$	$11,2 \pm 0,7$	$256 \pm 3,7$
Среднее	$3,90 \pm 0,03$	$38,2 \pm 0,9$	$12,4 \pm 1,5$	206 ± 25
Значимость различий, p^*	ns	$< 0,001$	0,002	0,002

Примечание. *Уровень значимости (p) различий средних значений почвенных характеристик между лесными насаждениями разного возраста; ns – различия недостоверны.

Потенциальная кислотность почв (слой 0–20 см) смешанного леса составляет в среднем (\pm SE) $3,90 \pm 0,03$ ед. pH, что чуть выше, чем в почвах более молодых лесных насаждений ($pH = 4,05 \pm 0,08$). Эти различия могут быть обусловлены разным породным составом древостоя и, следовательно, различиями в листовом опаде лесных насаждений: преимущественно лиственным на участках бывшей пашни с молодым лесом и лиственно-хвойным в смешанном лесу.

Скорость базального дыхания верхнего 20-см слоя почв на участках с молодой древесной растительностью изменялась довольно существенно: от 22,9 до 32,4 мг С/кг почвы/сут, составляя в среднем (\pm SE) $27,8 \pm 2,7$ мг С/кг почвы/сут (табл. 3). Почвы смешанного леса, несмотря на большее содержание органического вещества, характеризовались достоверно более низкой интенсивностью БД ($p = 0,002$) при высоком разбросе значений (от 10,6 до 15,4 мг С/кг почвы/сут). Средняя величина БД составила $12,4 \pm 1,5$ мг С/кг почвы/сут, что в 2 раза меньше, чем интенсивность БД на участках, зарастающих молодым лесом. Это, с одной стороны, может объясняться более высокой кислотностью почв смешанного леса, что может угнетать микробное сообщество (Susyan et al., 2011; Kurganova et al., 2021), а с другой – меньшей доступностью ОВ верхнего слоя этих почв микробному разложению по причине преобладания в составе опада трудноразлагаемой хвои.

Содержание $C_{\text{мик}}$ в почвах лесных участков тесно коррелировало со скоростью БД ($r = 0,93$; $p = 0,007$). Так, в почве под смешанным лесом (слой 0–20 см) количество углерода микробной биомассы было значимо ниже ($p = 0,002$), чем в почвах участков бывшей пашни с молодой древесной растительностью: 206 ± 25 против 390 ± 44 мг С/кг почвы. В почвах лесных участков вариабельность скорости базального дыхания на 86% объяснялась изменчивостью содержания $C_{\text{мик}}$ ($p = 0,007$).

Содержание $C_{\text{орг}}$ в почвах всех лесных участков резко убывает вниз по профилю (рис. 2), демонстрируя классический гумусо-аккумулятивный характер распределения $C_{\text{орг}}$ в слое 0–50 см. В почве смешанного леса содержание $C_{\text{орг}}$ снижается от 20,0 до 1,1 г С/кг почвы, а в почвах при естественном лесовозобновлении на бывших сельскохозяйственных угодьях уменьшение содержания $C_{\text{орг}}$ выражено чуть менее рельефно: от 12,5 до 1,4 г С/кг почвы. И хотя в пределах всех слоёв верхней 50-см толщи почв смешанного леса содержание $C_{\text{орг}}$ выше, чем в соответствующих слоях участков, зарастающих молодым лесом, значимые различия по содержанию $C_{\text{орг}}$ между почвами лесных участков разного возраста имеют место только в слое 0–10 см.

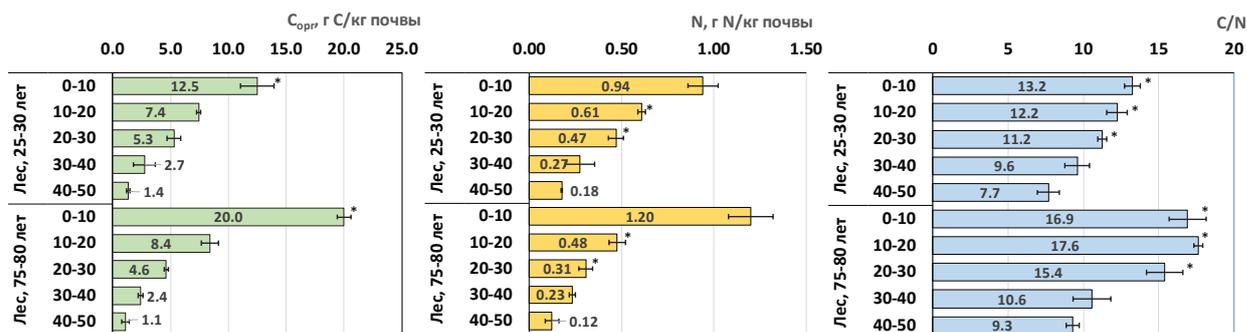


Рисунок 2. Изменение среднего содержания органического углерода (C_{орг}), общего азота (N) и соотношения C/N в 0–50 см слое почв лесных участков Карбонового полигона «Угра». (Знак * показывает значимые различия (p < 0,05) между лесными насаждениями разного возраста по почвенным свойствам на одной глубине).

Содержание N в слое 0–50 см в целом повторяет динамику изменения C_{орг}, демонстрируя наиболее существенные, но не значимые различия между почвами лесных участков разного возраста в слое 0–10 см: 1,20 г N/кг почвы во вторичном смешанном лесу против 0,94 г N/кг почвы участков молодого леса (см. рис. 2). Вместе с тем, на глубинах 10–20 и 20–30 см содержание N в почве смешанного леса значимо выше, чем в почве под более молодыми насаждениями при абсолютной разнице между ними 0,13–0,16 г N/кг почвы.

Соотношение C/N в почвах смешанного леса составляет 17–18 в верхнем 20 см слое; это ожидаемо выше, чем в том же слое почв более молодых лесных насаждений на бывших сельхозугодьях, где величина C/N имеет величину 12–13. С глубиной отношение C/N становится более узким и в слое 40–50 см оно составляет 7,7–9,3. И хотя различия по этому показателю мы наблюдаем по всему профилю почв, значимая разница между лесными участками разных возрастов характерна только для слоя 0–30 см. Более широкое отношение C/N в ОВ почв смешанного леса, свидетельствующее о его меньшей обогащённости азотом, также является причиной их более низкой микробной активности по сравнению с почвами участков молодой древесной растительности. Сходные закономерности отмечались нами также для дерново-подзолов залежного хроноряда в Костромской области (Kurganova et al., 2021).

Запасы углерода и азота в почвах лесных участков. Послойное распределение запасов C_{орг} и N в верхней 50-см толще практически полностью повторяет их содержание, представленное на рис. 2. Поэтому проанализируем суммарные запасы C_{орг} и N в бывшем пахотном слое 0–20 и для верхней 50-см толщи в целом. Для лесных участков одного возраста характерна существенная вариабельность суммарных запасов этих биогенных элементов (табл. 4), что обусловлено, по-видимому, не только природной неоднородностью почвенного покрова, но и локальными особенностями зарастания бывших пахотных почв.

Таблица 4

Суммарные запасы C_{орг} и N в слоях 0–20 и 0–50 см почв лесных участков Карбонового полигона «Угра»

Слой, см	Лесные участки, 25–30 лет			Вторичный лес, 75–80 лет			Средние запасы		
	F1	F2	F3	F4	F5	F6	25–30 лет	75–80 лет	p*
Запасы C _{орг} (т С/га)									
0-20	30,3	26,3	22,0	29,5	36,2	31,9	25,9 ±2,4	32,5 ±2,0	ns
0-50	42,0	40,7	41,5	42,3	50,1	43,5	41,3 ±0,4	45,3 ±2,4	ns
Запасы N (т N/га)									
0-20	2,19	2,21	1,75	1,57	2,29	1,90	2,02 ±0,15	1,93 ±0,21	ns
0-50	3,45	3,61	3,58	2,67	3,46	2,75	3,54 ±0,05	2,96 ±0,25	0,02

Примечание. *Уровень значимости (p) различий между средними величинами запасов C_{орг} и N в почвах лесных насаждений разного возраста; ns – различия недостоверны.

Средние запасы C_{орг} в слое 0–20 см почв смешанного леса составляют 32,5 ± 2,0 т С/га или 72% от общих запасов C_{орг} в слое 0–50 см (см. табл. 3). В верхнем 20-см слое почв зарастающей

лесом бывшей пашни запасы $C_{\text{орг}}$ несколько ниже ($26,2 \pm 2,4$ т С/га), но значимо не отличаются от таковых в более зрелом лесном насаждении (см. табл. 4). Их доля составляет 63% от общих запасов $C_{\text{орг}}$ в 50-см толще. Средние запасы N в слое 0–20 см почв лесных участков разного возраста близки между собой, а в слое 0–50 см почвы лесозарастающих сельскохозяйственных угодий содержат значимо больше N ($p = 0,02$), чем почвы смешанного леса: 3,55 против 2,96 т N/га. Это объясняется разным составом поступающего в почву листового опада, который в 25–30 летних лесных насаждениях состоит преимущественно из листвы мелколиственных пород и опада лесных трав более богатых азотом по сравнению с хвойно-лиственным опадом леса 75–80-летнего возраста (Ларионова и др., 2017).

Характеристика свойств почв пахотных и залежных участков. Почвы пахотных и залежных участков под луговой растительностью характеризуются близким гранулометрическим составом (табл. 5) и, в соответствии с классификацией Н.А. Качинского, относятся к супесчаным, поскольку содержание физической глины ($< 0,01$ мм) в них изменяется в пределах 16,8–19,6% ($< 20\%$). В слое 0–20 см преобладающими являются фракции песка ($< 0,05$ мм; 53–60%) и крупной пыли (0,05–0,01 мм; 22–30%).

Таблица 5

Результаты гранулометрического анализа почв пахотных и залежных участков
Карбонового полигона «Угра»

Объект	Фракции (мм), %						Физ. глина	Физ. песок
	1–0,25	0,25–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005–0,001	<0,001	< 0,01	> 0,01
Пахотные участки								
Ag1	32,22	21,78	29,20	5,88	7,84	3,08	16,80	83,20
Ag2	33,49	18,35	30,28	6,40	8,40	3,08	17,88	82,12
Ag3	43,40	10,44	26,60	6,08	8,84	4,64	19,56	80,44
Ag4	42,44	12,09	26,48	6,08	8,92	4,00	19,00	81,00
Залежные участки (25–30 лет, луговая растительность)								
Ab-1	33,63	21,03	27,70	5,90	9,61	2,14	17,65	82,35
Ab-2	47,25	11,95	22,14	5,59	10,04	3,04	18,66	81,34

Величина НВ в слое 0–20 см в пахотных почвах варьирует незначительно – от 36 до 39%, составляя в среднем (\pm SE) $37,8 \pm 0,7\%$ (табл. 6). В почвах залежных участков под луговой растительностью величины НВ значимо ниже ($p = 0,03$), чем на пашне и изменяются от 32 до 37%. Среднее значение НВ в этих почвах равно $34,8 \pm 2,3\%$, что близко к средней величине НВ в почвах участков с молодым лесом ($33,3 \pm 0,4\%$).

Таблица 6

Наименьшая влагоёмкость (НВ), базальное дыхание (БД) и содержание микробного углерода ($C_{\text{мик}}$) в почвах пахотных и залежных участков Карбонового полигона «Угра» (слой 0–20 см)

Участок	pH(KCl)	НВ, %	БД, мг С/кг почвы/час	С _{мик} , мг С/кг почвы
Пахотные участки				
Ag1	$5,72 \pm 0,15$	$36,6 \pm 0,12$	$12,9 \pm 0,3$	$184 \pm 6,5$
Ag2	$5,06 \pm 0,02$	$36,8 \pm 0,63$	$12,6 \pm 0,3$	$197 \pm 4,7$
Ag3	$5,27 \pm 0,05$	$39,3 \pm 1,09$	$19,2 \pm 0,1$	$281 \pm 3,4$
Ag4	$5,32 \pm 0,02$	$38,5 \pm 0,68$	$16,1 \pm 1,1$	$313 \pm 8,5$
Среднее	$5,34 \pm 0,16$	$37,8 \pm 0,7$	$15,2 \pm 1,6$	244 ± 32
Залежные участки (25–30 лет, луговая растительность)				
Ab-1	$5,78 \pm 0,07$	$37,1 \pm 0,08$	$31,4 \pm 1,9$	491 ± 6
Ab-2	$5,75 \pm 0,01$	$32,6 \pm 0,24$	$32,4 \pm 1,4$	678 ± 17
Среднее	$5,76 \pm 0,01$	$34,8 \pm 2,3$	$31,9 \pm 0,5$	584 ± 94
Уровень значимости, p^*	0,005	0,03	0,002	0,002

Примечание. *Уровень значимости (p) различий средних значений почвенных характеристик между пахотными и залежными участками.

Потенциальная кислотность почв пашни (слой 0–20 см) варьирует от 5,1 до 5,7 ед. pH, составляя в среднем (\pm SE) $5,34 \pm 0,16$, что значимо ниже ($p = 0,005$), чем в почвах залежей,

средняя величина рН в которых равна $5,76 \pm 0,01$ ед. рН (см. табл. 6). Выявленные различия между пахотными и залежными участками могут быть обусловлены как разным составом поступающих в почву растительных остатков, так и природной неоднородностью почвенного покрова.

Скорость БД верхнего 20-см слоя пахотных почв изменялась довольно существенно: от 12,6 до 19,2 мг С/кг почвы/сут, составляя в среднем $15,2 \pm 1,6$ мг С/кг почвы/сут (см. табл. 6). Почвы залежей отличаются более высоким содержанием и большей биологической доступностью ОВ в слое 0–20 см, что отражается и в их большей микробной активности по сравнению с пахотными почвами. Средняя скорость БД в залежных почвах была в 2 раза выше, чем в пахотных и составила $31,9 \pm 0,5$ мг С/кг почвы/сут.

Содержание $S_{\text{мик}}$ и скорость БД в верхнем 20-см слое почв пашни и залежей тесно коррелировали между собой ($r = 0,95$; $p = 0,004$), свидетельствуя о том, что изменчивость величины БД на 90% объяснялась вариабельностью содержания $S_{\text{мик}}$. В среднем в пахотных почвах количество углерода микробной биомассы было в 2,4 раза ниже, чем в почвах залежных участков: 244 ± 32 против 584 ± 94 мг С/кг почвы. Эта закономерность объясняется более высоким содержанием в почвах залежей легкоразлагаемого опада травянистых растений, который является хорошо доступным питательным субстратом для почвенных микроорганизмов (Ларионова и др., 2017). Накопление опада трав в почвах залежей стало возможным после прекращения отчуждения биомассы растений при сельскохозяйственном использовании этих земель (Kurganova et al., 2018; 2021).

Содержание $S_{\text{орг}}$ в почвах залежных участков резко убывает вниз по профилю (рис. 3). В соответствии с гумусо-аккумулятивным характером распределения в пределах верхних 0–50 см почвы, оно снижается более чем в 10 раз – от 14,7 в слое 0–10 см до 1,4 г С/кг почвы в слое 40–50 см. В почвах пашни мы наблюдаем 8-кратное снижение содержания $S_{\text{орг}}$ (от 12,2–12,5 до 1,6 г С/кг почвы). Значимые различия по содержанию $S_{\text{орг}}$ между почвами пашни и залежей под луговой растительностью имеют место только в слое 10–20 см.

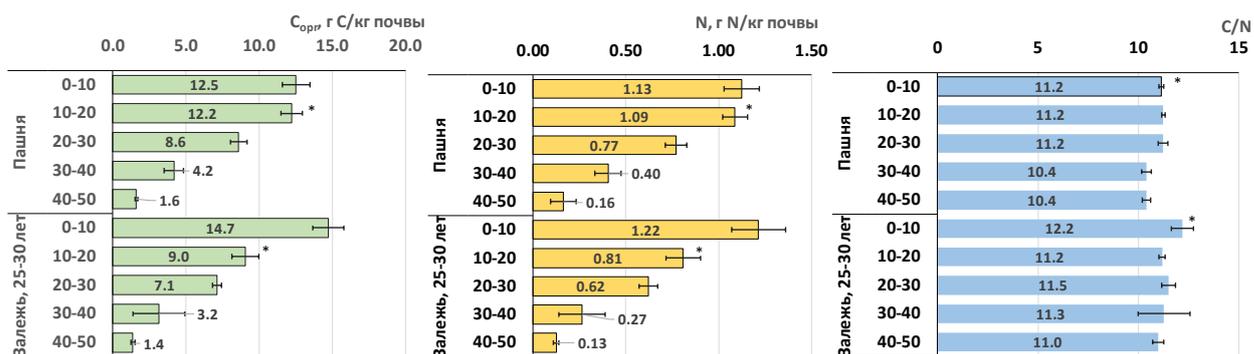


Рисунок 3. Изменение содержания органического углерода ($S_{\text{орг}}$), общего азота (N) и соотношения C/N в 0–50 см слое почв пахотных и залежных участков Карбонового полигона «Угра». (Знак * показывает значимые различия ($p < 0,05$) между залежными и пахотными участками по почвенным характеристикам на одной глубине).

Содержание азота в почвенном слое 0–50 см в целом повторяет закономерности изменения содержания $S_{\text{орг}}$, также демонстрируя значимые различия между почвами пашни и залежей только в слое 10–20 см: 1,09 против 0,81 г N/кг почвы (см. рис. 3). Соотношение C/N в пахотных почвах с глубиной убывает от 11,2 до 10,4. В почвах залежей соотношение C/N чуть выше, чем в пахотных почвах, и с глубиной оно уменьшается от 12,2 в слое 0–10 см до 11,0 в слое 40–50 см. Значимые различия по этому показателю между залежными и пахотными почвами мы наблюдаем только в самом верхнем 10-см слое почв. Вместе с тем, отношение C/N в ОВ почв залежных участков ниже, чем в почвах лесных участков, поскольку травяной опад содержит больше азота по сравнению с лесной подстилкой (Ларионова и др., 2017).

Запасы углерода в почвах пахотных и залежных участков. Наибольший интерес представляют суммарные запасы $S_{\text{орг}}$ и N в бывшем пахотном 20-см почвенном слое и во всей 50-см толще (табл. 7), поскольку послойное распределение запасов $S_{\text{орг}}$ и N в верхнем 50-см слое сходно с изменением их содержания, представленного на рис. 3.

Таблица 7

Суммарные запасы $C_{орг}$ и N (т/га) в слоях 0-20 и 0-50 см почв лесных участков Карбонового полигона «Угра»

Слой, см	Пахотные участки			Залежные участки			Средние запасы		
	Ar1	Ar2	Ar3	Ar4	Ab-1	Ab-2	Пашня	Залежи	p*
Запасы $C_{орг}$ (т С/га)									
0-20	28,3	36,1	37,9	31,9	27,6	34,0	33,5 ±1,5	30,8 ±1,4	ns
0-50	48,1	63,2	66,5	66,6	48,5	50,4	61,1 ±3,1	49,5 ±1,4	0,05
Запасы N (т N/га)									
0-20	2,51	3,17	3,41	2,90	2,09	2,67	3,00 ±0,14	2,64 ±0,14	ns
0-50	4,36	5,54	6,10	6,25	3,66	3,94	5,56 ±0,30	4,26 ±0,15	0,02

Примечание. *Уровень вероятности различий средних значений почвенных характеристик между лесными насаждениями разного возраста; ns — различия недостоверны.

Для пахотных участков характерна существенная вариабельность суммарных запасов $C_{орг}$ и N в почвенных слоях 0–20 и 0–50 см (см. табл. 7). Это, вероятно, обусловлено не только природной неоднородностью почвенного покрова исследуемой территории, но и особенностями использования современных пахотных почв, которые в течение последних 30 лет периодически находились то в залежном, то в обработанном состоянии. Средние запасы $C_{орг}$ в слое 0–20 см почв пашни составляли 33,5 ± 1,5 т С/га или чуть больше 50% от общих запасов $C_{орг}$ в слое 0–50 см. В верхнем 20-см слое почв залежных участков запасы $C_{орг}$ были чуть ниже — 30,8 ± 1,4 т С/га, что составляет 62% от общих запасов $C_{орг}$ в 50-см толще. По этому показателю залежные почвы под луговой растительностью схожи с почвами участков молодого леса. В 50-см слое почвы средние запасы $C_{орг}$ в почвах пашни значимо ($p = 0,05$) превышают соответствующие запасы $C_{орг}$ в почвах залежей.

Средние запасы N в верхнем 20 см слое пахотных участков составляют 3,00 ± 0,14 т N/га, а в почвах залежей они в 1,3 раза ниже – 2,64 ± 0,14 г N/га, что связано, по-видимому, с различиями в составе поступающих на поверхность почв растительных остатков. В слое 0–50 см разница запасов N в почвах пашни и залежей становится ещё более существенной (в 1,6 раза) и значимой при $p = 0,02$.

Запасы углерода в фитомассе и мортмассе лесных участков Карбонового полигона «Угра». Прекращение сельскохозяйственной деятельности на бывших пахотных угодьях в пределах территории КП «Угра» привело к их активному лесозарастанию и формированию на них через 25–30 лет молодых сосново-березовых древостоев с примесью осины (табл. 8). Их образование обуславливается близким расположением более возрастных (60–65 и 75–80 лет) лесных насаждений, которые обеспечивают поступление семян, достаточное для возобновления на залежах древесной растительности. В результате к возрасту 25–30 лет древостой, сформированный на бывших сельхозугодьях, фактически представляет собой полностью покрытые лесом земли.

Таблица 8

Формулы древостоя и запасы C в фитомассе древостоя и мортмассе сухостоя лесных участков

Параметр	Лесные участки 25-30 лет				Вторичный лес 75-80 лет			
	F1	F2	F3	среднее	F4	F5	F6	Среднее
Формула древостоя*	10Б+С	9Б1С ед.Ос	9Б1С		9С1Б+Ос ед. Е	10С+Д+Б ед. Кл, Е, Ос, Рб	6С3Б1Е ед. Д, Ив	
Фитомасса древостоя, т С/га	69,8	64,3	42,5	58,9 ± 8,3	150,8	214,8	159,6	175 ± 20
Мортмасса сухостоя, т С/га	0,3	0,1	0	0,1 ± 0,1	4,0	13,7	0,8	6,2 ± 3,9
Всего, т С/га	70,1	64,5	42,5	59,0 ± 8,4	154,8	228,5	160,4	181 ± 24

Примечание. *Б – береза повислая (*B. pendula*), С – сосна обыкновенная (*P. sylvestris*), Ос – осина (*P. tremula*), Е – ель европейская (*Picea abies*), Д – дуб черешчатый (*Quercus robur*), Кл – клён остролистый (*Acer platanoides*), Рб – рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia*), Ив – ива козья (*Salix caprea*).

Процесс лесовосстановления на бывших сельхозугодьях сопровождается активным накоплением углерода, аккумулируемого в фитомассе древесной растительности (Люри и др., 2011; Telesnina et al., 2017; 2019). На территории КП «Угра» деревья к 25–30-ти летнему возрасту достигали среднего диаметра 10–12 см и средней высоты 15–17 м. Расчёты, проведённые по национальным методическим указаниям, разработанным в соответствии с рекомендациями МГЭИК, показали, что общие запасы С (с учётом сухостоя) на лесных участках 25–30-ти летнего возраста варьируют от 42,5 до 70,1 т С/га, составляя в среднем $59,0 \pm 8,4$ т С/га. Более 99% накопленного углерода сосредоточено здесь в фитомассе растущих деревьев, а доля сухостоя в молодых лесонасаждениях ничтожно мала. Запасы углерода в верхнем 50-см слое почв на участках с 25–30 летней древесной растительностью примерно в 1,5 раза ниже, чем запасы углерода в фитомассе древостоя.

Лесные насаждения 75–80-ти летнего возраста отличаются более высоким разнообразием породного состава, хотя сосна обыкновенная по-прежнему остаётся доминирующей породой (см. табл. 8). Таким образом, на этих лесных участках идёт формирование зональных лесных экосистем – смешанных лесов. Оно включает в себя процессы, типичные для лесных насаждений данной природно-климатической зоны: естественное изреживание древостоя (уменьшение густоты стояния деревьев), изменение породного состава насаждения и усиление его дифференциации. В результате этих процессов лесной массив становится менее однородным по породному составу и запасу древесины. С одной стороны, это может быть сопряжено с влиянием условий произрастания древесных растений (различия в почвенно-геоморфологических и гидрологических условиях), а с другой – с уменьшением количества деревьев на единицу площади в результате конкурентного отбора, что приводит к увеличению влияния на общий запас древесины в насаждении отдельных деревьев старших возрастов. Также на данном этапе на запас древесины и состав древостоя начинают оказывать существенное влияние нарушающие воздействия – низовые пожары, ветровалы, буреломы, вспышки болезней и колебания численности насекомых-вредителей. По этим причинам общие запасы С в древостоях 75–80-ти летнего возраста варьируют в более широком диапазоне величин – от 155 до 229 т С/га, составляя в среднем 181 ± 24 т С/га. Доля мёртвой древесины в общем запасе С здесь невысока и составляет около 3,4%, а более 95% депонированного углерода приходится на фитомассу растущих деревьев. Можно полагать, что данный возрастной интервал для древостоев не является возрастом максимального накопления углерода, и дальнейшее развитие экосистем по зональному типу приведёт к увеличению депонирования углерода в фитомассе лесных насаждений Карбонового полигона «Угра». Общие запасы С в смешанном лесу 75–80-летнего возраста в 3 раза превышают запасы в древостоях 25–30-летнего возраста. Однако, возрастная динамика древостоев сопровождается не только ростом запасов углерода, депонированного в фитомассе и мортмассе рассматриваемых насаждений, но и уменьшением в общем углеродном бюджете доли (но не общего запаса) углерода, депонированного в почве. Количество $S_{орг}$ в верхнем 50-см слое почв смешанного леса 75–80-ти летнего возраста в 4 раза меньше, чем общие запасы С в древесной фитомассе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Преобладающим типом почв на Карбоновом полигоне «Угра» являются дерново-подзолистые глубоко оглеенные почвы, сформированные на флювиогляциальных отложениях. Их свойства в значительной степени зависят от типа современного землепользования, который, в свою очередь, определяет характер поступающих на поверхность почвы растительных остатков. Почвы характеризуются супесчаным гранулометрическим составом, слабокислой (пашня и залежи) или кислой (лесные участки) реакцией среды. Различия по содержанию $S_{орг}$ и N, отношению C/N и микробным характеристикам (скорость базального дыхания и $S_{мик}$) почв наиболее выражены в верхнем 20-см слое.

Содержание $S_{орг}$ и N в почвах всех типов землепользования, кроме пахотных участков, резко убывает вниз по профилю, демонстрируя классический гумусо-аккумулятивный характер распределения $S_{орг}$ и N в почвенном слое 0–50 см. Соотношение C/N в изученных почвах широко варьирует и зависит от состава поступающего на поверхность почвы растительного опада. Микробная активность в слое 0–20 см почв КП «Угра» убывает в следующем ряду: залежь под луговой растительностью > 25–30-летние лесные насаждения > пашня > смешанный лес. Показано, что варьирование скорости базального дыхания на 86–90% определяется содержанием $S_{мик}$ в почве.

Максимальные запасы $C_{\text{орг}}$ в слое 0–50 см характерны для почв пашни ($65,4 \pm 4,4$ т С/га), а минимальные ($41,4 \pm 0,4$ т С/га) – для почв 25–30-летних лесных участков. Процесс лесовосстановления на бывших сельхозугодьях сопровождается активным накоплением углерода, аккумулированного в фитомассе древесной растительности. Превалирующим пулом С в лесных экосистемах, независимо от их возраста, является фитомасса древесных растений. Её запасы в лесных насаждениях 25–30-летнего возраста и смешанного леса превосходили суммарные запасы $C_{\text{орг}}$ в 50-см слое почв в 1,6 и 4 раза, соответственно. Общие запасы С в смешанном лесу были в 3 раза выше, чем в 25–30-ти летних древостоях, свидетельствуя о том, что возраст лесных насаждений является ключевым фактором, определяющим суммарные запасы С в почве и фитомассе.

В перспективе, развитие научных исследований на Пилотном Карбоновом полигоне «Угра» будет включать следующие направления: (1) анализ влияния композиций азот- и бор- содержащих удобрений и прореживания древостоя на запасы надземной и подземной фитомассы, а также основных составляющих углеродного баланса лесных экосистем; (2) оценка эффективности технологий регенеративного земледелия с целью увеличения углерод-секвестрирующей способности почв; (3) испытание технологий дистанционного мониторинга углеродного баланса лесных территорий и сельскохозяйственных земель.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность сотрудникам Независимой аккредитованной лаборатории Института Биологии Коми «Коми научный центр Уральского отделения Российской Академии наук» за качественно выполненное определение содержания углерода и азота в почвенных образцах.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Авторы признательны руководству ООО «Контролтугоу.Ру» за финансирование исследовательских работ на Пилотном Карбоновом полигоне «Угра». Публикация подготовлена в рамках Государственного задания ФИЦ ПНЦБИ РАН (рег. № 121040800126-5) при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект 075-15-2021-610) и Правительства Тюменской области (проект Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра № 89-ДОН (1)).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Битва за климат: карбоновое земледелие как ставка России* // Экспертный доклад / под ред. А.Ю. Иванова, Н.Д. Дурманова (рук-ли авт. кол.); М.П. Орлов, К.В. Пиксендеев, Ю.Е. Ровнов и др.; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2021. 120 с. (e-book).
2. *Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с.
3. *Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н., Баматов И.М.* Глобальный климат и почвенный покров – последствия для землепользования России // *Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева*. 2021. № 107. С. 5–32. DOI: [10.19047/0136-1694-2021-107-5-32](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-107-5-32)
4. *Карбоновые полигоны*. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. [Электронный ресурс]. URL: https://minobrnauki.gov.ru/action/poligony/index.php?sphrase_id=108077 (дата обращения 07.02.2022)
5. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И. *Классификация и диагностика почв России*. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
6. *Курганова И.Н., Кудяров В.Н.* Экосистемы России и глобальный бюджет углерода // *Наука в России*. 2012. № 5. С. 25–33.
7. *Ларионова А.А., Квиткина А.К., Быховец С.С., Лопес де Гереню В.О., Колягин Ю.Г., Каганов В.В.* Влияние азота на минерализацию и гумификацию лесных опавов в модельном эксперименте // *Лесоведение*. 2017. № 2. С. 128–139.
8. 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.
9. *Макаров И.А.* Глобальное изменение климата как вызов мировой экономике и экономической науке // *Экономический журнал ВШЭ*. 2013. № 3. С. 470–495.
10. *Методические указания по количественному определению поглощения парниковых газов*. 2017. Утверждены Министерством природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Распоряжение от 30 июня 2017 г. N 20-р.

11. *Общесоюзные нормативы для таксации лесов* (утв. приказом Госкомлеса СССР от 28 февраля 1989 г. N 38)
12. Соколов М.С., Глинушкин А.П., Спиридонов Ю.Я., Торопова Е.Ю., Филипчук О.Д. Технологические особенности почвозащитного ресурсосберегающего земледелия (в развитие концепций ФАО) // *Агрехимия*. 2019. № 5. С. 3–20. DOI: 10.1134/S000218811905003X
13. Шейн Е.В. *Курс физики почв*. М.: Изд-во Моск.ун-та, 2005. 432 с.
14. Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils // *Soil Biology and Biochemistry*. 1978. Vol. 10. No. 3. P. 215–221. DOI: 10.1016/0038-0717(78)90099-8
15. Kudryarov V.N. Soil-Biogeochemical Aspects of Arable Farming in the Russian Federation // *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. P. 94–104. DOI: 10.1134/S1064229319010095
16. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Gallardo Lancho J.F., Oehm C.T. Evaluation of the rates of soil organic matter mineralization in forest ecosystems of temperate continental, mediterranean, and tropical monsoon climates // *Eurasian Soil Science*. 2012. Vol. 45. No. 1. P. 68–79. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229312010085>
17. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Mostovaya A.S., Ovsepyan L.A., Telesnina V.M., Lichko V.I., Baeva Y.I. The Effect of Reforestation on Microbial Activity in Post-Agrogenic Soils in European Part of Russia // *Contemporary Problems of Ecology*. 2018. Vol. 7. P. 7–17. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425518070089>
18. Kurganova I.N., Telesnina V.M., Lopes de Gerenyu V.O., Lichko V.I., Karavanova E.I. The Dynamics of Carbon Pools and Biological Activity of Retic Albic Podzols in Southern Taiga during the Postagrogenic Evolution // *Eurasian Soil Science*. 2021. Vol. 54. No. 3. P. 337–351. DOI: 10.1134/S1064229321030108
19. Susyan E.A., Wirth S., Ananyeva N.D., Stolnikova E.V. Forest succession on abandoned arable soils in European Russia – Impacts on microbial biomass, fungal-bacterial ratio, and basal CO₂ respiration activity // *European Journal of Soil Biology*. 2011. Vol. 47. P. 169–174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.04.002>
20. Telesnina V.M., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Ovsepyan L.A., Lichko V.I., Ermolaev A.M., Mirin D.M. Dynamics of Soil Properties and Plant Composition during Postagrogenic Evolution in Different Bioclimatic Zones // *Eurasian Soil Science*. 2017. Vol. 50, No. 12. P. 1458–1477. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229317120109>
21. Telesnina V.M., Zhukov M.A. The Influence of Agricultural Land Use on the Dynamics of biological Cycling and Soil Properties in the Course of Postagrogenic Succession (Kostroma Oblast) // *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. No. 9. P. 1114–1129. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229319070135>

Поступила в редакцию 08.02.2022

Принята 16.02.2022

Опубликована 17.02.2022

Сведения об авторах:

Курганова Ирина Николаевна – доктор биологических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории почвенных циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук - обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); ikurg@mail.ru

Лопес де Гереню Валентин Овидиович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории почвенных циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук - обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); vlopes@mail.ru

Ипп Сергей Леонидович – управляющий директор блока «Агро» ООО «Контролтугоу.Ру» (г. Москва, Россия); s.ipp@ctrl2go.com

Каганов Владимир Владимирович – научный сотрудник лаборатории структурно-функциональной организации и устойчивости лесных экосистем ФГБУН «Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН» (г. Москва, Россия); kaganov.vl@gmail.ru

Хорошаев Дмитрий Александрович – младший научный сотрудник лаборатории почвенных циклов азота и углерода Института физико-химических и биологических проблем почвоведения Российской академии наук - обособленное подразделение ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований РАН» (г. Пушкино, Россия); d.khoroshaev@gmail.com

Рухович Дмитрий Иосифович – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией почвенной информатики ФГБНУ ФИЦ «Почвенный институт им. В.В. Докучаева» (г. Москва, Россия); landmap@yandex.ru

Сумин Юрий Витальевич – кандидат технических наук, заместитель управляющего директора Блока «Агро» ООО «Контролтугоу.Ру» (г. Москва, Россия); y.sumin@ctrl2go.com

Дурманов Николай Дмитриевич – доктор медицинских наук, специальный представитель Министерства высшего образования и науки РФ по вопросам биологической и экологической безопасности, вице-президент по научно-техническому развитию ООО «Контролтугоу.Ру» (г. Москва, Россия); n.durmanov@ctrl2go.com

Кузяков Яков Викторович – профессор, доктор биологических наук, руководитель отдела почвоведения экосистем умеренных широт и профессор отдела агрономического почвоведения Гёттингенского университета (г. Гёттинген, Германия); ykuzyakov@yandex.com

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

PILOT CARBON POLYGON IN RUSSIA: ANALYSIS OF CARBON STOCKS IN SOILS AND VEGETATION

© 2022 I. N. Kurganova ^{1,2}, V. O. Lopes de Gerenyu ¹, S. L. Ipp³, V. V. Kaganov ⁴, D. A. Khoroshaev ¹, D. I. Rukhovich⁵, Yu. V. Sumin³, N. D. Durmanov³, Ya. V. Kuzyakov ⁶

¹*Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Science, Pushchino, Russia. E-mail: ikurg@mail.ru*

²*University of Tyumen, Tyumen, Russia.*

³*LLC «Ctrl2Go.Ru», Moscow, Russia.*

⁴*Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.*

⁵*V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, Russia.*

⁶*University of Göttingen, Göttingen, Germany.*

The aim of the study: Analysis of carbon stocks in soils and vegetation on the territory of the Pilot Carbon Polygon “Ugra”.

Location and time of the study. Kaluga region, Ugra National Park, March–October, 2020.

Methodology. The study was carried out on soils of four land use types: i) arable lands, ii) abandoned arable lands under grassland vegetation, iii) young forest vegetation (25–30 years old), and iv) mature mixed forest (75–80 years old). Two-four plots were located in each land use type. Soil samples were taken up to 50 cm by 10 cm layers. The content of organic carbon (C_{org}), total nitrogen (N), and the C/N ratio were determined. Considering soil density, the C_{org} and N stocks were calculated in the top 20 and top 50 cm. In the top 20 cm, the particle size distribution, pH(KCl), water holding capacity (WHC), and microbial properties (basal respiration, BR and content of microbial biomass, C_{mic}) were determined. Based on the forest inventory, the carbon stocks in phytomass and mortmass (dead trees) were estimated.

Main results. The Retisols of the Carbon Polygon “Ugra” are characterized by a sandy loamy texture and slightly acidic (arable and abandoned lands) or acidic (forest areas) reaction. Microbial activity in the top 20 cm of soil decreases in the following order: abandoned lands under grassland > young forest stands (25–30 years old) > arable lands > mature mixed forest. The BR variability was determined by 86–90 % by the C_{mic} content. The highest C_{org} stock in the 0–50 cm layer was in the arable soils (65.4 ± 4.4 t C/ha), and the lowest C_{org} stock (41.4 ± 0.4 t C/ha) was observed in the soils under young forest. The C/N ratio in the top 10 cm varied from 8.9 to 17.6 and depended on the composition of plant litter at the soil surface. The main C pool in the forest ecosystems, regardless of their age, was the phytomass of woody plants. This C pool exceeded the total C_{org} stocks in the 50-cm soil layer by 1.6 and 4 times in young forest and mature mixed forest, respectively. The total C stocks in the mature mixed forest were 3 times larger than in young forest stands.

Conclusions. The C stocks and the state of the soils of the Carbon Polygon “Ugra” depend on the current land use type, which in turn determines the composition of plant residues input on and in the soil. This is the reason for the most distinct differences between the studied soils in terms of C_{org} and N content, C/N ratio, and microbial characteristics. The age of forest stands is a key factor determining the total C stocks in soils and forest biomass.

Key words: Carbon polygons; forest and agricultural lands; Retisols; carbon and nitrogen content; microbial activity; carbon stock in forest biomass

How to cite: Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Ipp S.L., Kaganov V.V., Khoroshaev D.A., Rukhovich D.I., Sumin Yu.V., Durmanov N.D., Kuzyakov Ya.V. Pilot carbon polygon in Russia: analysis of carbon stocks in soils and vegetation // *The Journal of Soils and Environment*. 2022. 5(2). e169. DOI: [10.31251/pos.v5i2.169](https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.169) (in Russian with English abstract).

REFERENCES

1. *The battle for climate: carbon farming as Russia's bid* // Expert report / ed. A.Yu. Ivanov, N.D. Durmanov; M.P. Orlov, K.V. Piksendeev, Yu.E. Rovnov et al.; National research university «Higher school of economics». Moscow, 2021. 120 p. (e-book, in Russian).
2. *The Second Roshydromet Assessment Report on Climate Change and its Consequences in the Russian Federation*. Moscow, Roshydromet, 2014, 1009 p. (in Russian)
3. Ivanov A.L., Savin I.Yu., Stolbovov V.S., Dukhanin Yu.A., Kozlov D.N., Bamatov I.M. Global climate and soil cover – implications for land use in Russia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2021, Vol. 107, p. 5–32. DOI: [10.19047/0136-1694-2021-107-5-32](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2021-107-5-32) (in Russian)
4. *Carbon polygons*. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation [Electronic resource]. URL: https://minobrnauki.gov.ru/action/poligony/index.php?sphrase_id=108077 (appeal date 07/02/2022) (in Russian)
5. Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I. *Classification and diagnosis of soils in Russia*. Smolensk, Ojkumena Publ., 2004, 342 p. (in Russian)
6. Kurganova I.N., Kudayarov V.N. Russian ecosystems and global carbon budget, *Science in Russia*, 2012, No. 5, p. 25–33. (in Russian)
7. Larionova A.A., Kvitkina A.K., Bykhovets S.S., Lopes de Gerenyu V.O., Kolyagin Y.G., Kaganov V.V. The contribution of nitrogen to mineralization and humification of forest litter in simulation study, *Russian Journal of Forest Science*, 2017, No. 2, p. 128–139. (in Russian)
8. Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A., Nefedova T.G. *Agricultural land dynamics in Russia in the twentieth century and postagrogenic recovery of vegetation and soils*. Moscow, GEOS Publ., 2010, 415 p. (in Russian)
9. Makarov I.A. Global climate change as a challenge for the global economy and economic science, *Higher School of Economics Economic Journal*, 2013, Vol. 17, No. 3, p. 479–496. (in Russian)
10. *Methodological guidelines for quantitative determination of greenhouse gas absorption*. 2017. Approved by the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation. Order dated June 30, 2017. N 20-p. (in Russian)
11. *USSR Norms for Forest Inventory (approved by the Ministry of Forestry)*. Order of the State Committee for Forestry of the USSR of February 28, 1989. N 38) (in Russian)
12. Sokolov M.S., Glinushkin A.P., Spiridonov Yu.Ya., Toropova E.Yu., Filipchuk O.D. Technological features of soil-protective resource-saving agriculture (in the development of the FAO concept), *Agrochemistry*, 2019, No. 5, p. 3–20. DOI: [10.1134/S000218811905003X](https://doi.org/10.1134/S000218811905003X) (in Russian)
13. Shein E.V. *Soil physics course*. Moscow, MSU Publ., 2005, 432 p. (in Russian)
14. Anderson J.P.E., Domsch K.H. A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils, *Soil Biology and Biochemistry*, 1978, Vol. 10, No. 3, p. 215–221. DOI: [10.1016/0038-0717\(78\)90099-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(78)90099-8)
15. Kudayarov V.N. Soil-Biogeochemical Aspects of Arable Farming in the Russian Federation, *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, p. 94–104. DOI: [10.1134/s1064229319010095](https://doi.org/10.1134/s1064229319010095)
16. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Gallardo Lancho J.F., Oehm C.T. Evaluation of the rates of soil organic matter mineralization in forest ecosystems of temperate continental, Mediterranean, and tropical monsoon climates, *Eurasian Soil Science*, 2012, Vol. 45, No. 1, p. 68–79. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229312010085>
17. Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Mostovaya A.S., Ovsepyan L.A., Telesnina V.M., Lichko V.I., Baeva Y.I. The Effect of Reforestation on Microbial Activity in Post-Agrogenic Soils in European Part of Russia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, Vol. 7, p. 7–17. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1995425518070089>
18. Kurganova I.N., Telesnina V.M., Lopes de Gerenyu V.O., Lichko V.I., Karavanova E.I. The Dynamics of Carbon Pools and Biological Activity of Retic Albic Podzols in Southern Taiga during the Postagrogenic Evolution, *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No. 3, p. 337–351. DOI: [10.1134/S1064229321030108](https://doi.org/10.1134/S1064229321030108)
19. Susyan E.A., Wirth S., Ananyeva N.D., Stolnikova E.V. Forest succession on abandoned arable soils in European Russia – Impacts on microbial biomass, fungal-bacterial ratio, and basal CO₂ respiration activity, *European Journal of Soil Biology*, 2011, Vol. 47., p. 169–174. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.04.002>
20. Telesnina V.M., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Ovsepyan L.A., Lichko V.I., Ermolaev A.M., Mirin D.M. Dynamics of Soil Properties and Plant Composition during Postagrogenic Evolution in Different Bioclimatic Zones, *Eurasian Soil Science*, 2017, Vol. 50, No. 12, p. 1458–1477. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229317120109>
21. Telesnina V.M., Zhukov M.A. The Influence of Agricultural Land Use on the Dynamics of biological Cycling and Soil Properties in the Course of Postagrogenic Succession (Kostroma Oblast), *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 52, No. 9, p. 1114–1129. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229319070135>

Received 08 February 2022

Accepted 16 February 2022

Published 17 February 2022

About the author(s):

Kurganova Irina N. – Doctor of Biological Sciences, Habil, Associate Professor, Principal Researcher, laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon, Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); ikurg@mail.ru

Lopes de Gerenuy Valentin O. – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher, laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon, Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); vlopes@mail.ru

Ipp Sergei L. – Managing Director of Agro Block of LLC «Ctrl2Go.Ru» (Moscow, Russia); s.ipp@ctrl2go.com

Kaganov Vladimir V. – Researcher, Laboratory of structural and functional organization and resilience of forest ecosystems, Center of Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia); kaganov.vl@gmail.ru

Khoroshaev Dmitry A. – Junior Researcher, Laboratory of Soil Cycles of Nitrogen and Carbon, Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science of the Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russia); d.khoroshaev@gmail.com

Rukhovich Dmitry I. – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Head of laboratory of soil informatics, V.V. Dokuchaev Soil Science Institute (Moscow, Russia); landmap@yandex.ru

Sumin Yuri V. – Candidate of Technical Sciences, Deputy Managing Director of Agro Block of LLC «Ctrl2Go.Ru » (Moscow, Russia); y.sumin@ctrl2go.com

Durmanov Nikolai D. – Doctor of Medical Sciences, Habil., Special Representative of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for Biological and Environmental Safety, Vice President for Science and Technology Development of LLC «Ctrl2Go.Ru» (Moscow, Russia); n.durmanov@ctrl2go.com

Kuzyakov Yakov V. – Doctor of Biological Sciences, Habil, Full Professor, Head of the Department of Soil Science of Temperate Ecosystems, Professor of the Department of Agricultural Soil Science (Göttingen, Germany); ykuzyakov@yandex.com

The author read and approved the final manuscript



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