

Л. Александрова, А.С. Гордеев, В.Р. Бабичук, П.А. Курынцева, С.Ю. Селивановская

Казанский (Приволжский) федеральный университет, polinazwerewa@yandex.ru

## ОЦЕНКА ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ПОЧВЕ НА ТЕРРИТОРИИ КАРБОНОВОГО ПОЛИГОНА «КАРБОН – ПОВОЛЖЬЕ»

Для разработки технологий снижения эмиссии парниковых газов необходимо иметь представление о накоплении углерода в разных пулах, в частности в почве. В работе проведена оценка содержания общего и микробного углерода, численности бактерий и микромицет в почвах на территории карбонового полигона «Карбон – Поволжье» (Республика Татарстан). Полигон располагается на дерново-подзолистых почвах в подзоне южной тайги с типичным распределением горизонтов. Установлено, что с глубиной содержание общего углерода снижается на 87-93%, микробного углерода на 43-51%, содержание бактерий снижается на 99%, микромицет на 99%. Рассчитанный запас общего углерода составляет  $48.05 \pm 13.86$  т/га, микробного углерода –  $4.89 \pm 1.13$  т/га.

**Ключевые слова:** карбоновый полигон; дерново-подзолистые почвы; запас углерода в почвах; общий углерод; микробный углерод; Республика Татарстан.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.12.21>

### Введение

Являясь основной частью наземных экосистем и крупнейшим резервуаром углерода, лесные экосистемы играют важную роль в глобальном изменении климата и окружающей среды. Экологическое равновесие лесных экосистем напрямую связано с круговоротом углерода. Его течение, в частности, обусловлено процессами фотосинтеза и минерализации органических веществ. Основными пулами углерода в лесных экосистемах являются фитомасса, мертвая древесина, подстилка и органическое вещество почвы (Бакаева, Замолодчиков, 2009). Почва является ключевым компонентом глобального цикла углерода, в ней содержится 80% органического углерода биосферы. Так, по данным Батджэса (Batjes, 1996), почвенный покров Земли содержит около 1500 Pg (1 Pg = 1015 г) органического углерода, это в три раза больше, чем содержится в растительном покрове, и в два раза больше, чем в атмосфере. По данным другой группы исследователей (Chappell et al., 2015) органического углерода в почве содержится в три раза больше, чем в атмосфере. Измерение содержания углерода в разных формах и на различных почвенных горизонтах дает возможность более подробно изучить процессы, обеспечивающие круговорот углерода в биосфере. Известно, что наличие достаточного количества углерода в почве обуславливает ее плодородие. При этом почвенный углерод представлен органической и неорганической формами (Чимитдоржиева, 2017). Углерод служит источ-

ником питания для почвенной биомассы, которая обеспечивает образование и накопление в почве гумуса и микроэлементов (меди, цинка, бора, марганца, молибдена, кобальта), составляющих с гуминовыми веществами комплексы, легко усваиваемые растениями (Ларионов, 2019). При недостатке углерода происходит снижение микробной активности и ослабление рециклирующей активности азота (Прянишникова и др., 2015).

Содержание углерода в почве напрямую связано с деятельностью микроорганизмов, которые составляют более 95% почвенной биомассы и играют фундаментальную роль в качестве первичных продуцентов и редуцентов в круговороте и секвестрации углерода в почве (Mason et al., 2015; Wang et al., 2023). Большинство почвенных микроорганизмов являются гетеротрофами, которые используют органическое вещество в качестве энергии для роста и размножения (Liao et al., 2023). При этом почвенные микроорганизмы расходуют энергию как на конструктивные, так и на деструктивные процессы. За счет гетеротрофной деструкции органического вещества может происходить эмиссия  $\text{CO}_2$  в количествах, часто превышающих антропогенные поступления (Сорокин, Александров, 2013). При этом известно, что почвенная микробиота распределена неравномерно по глубине почвенных горизонтов, максимальная численность и разнообразие почвенной микробиоты отмечается в верхнем 0-10 см слое почвы. Ее типичными представителями являются бактерии родов *Acidobacteria*, *Actinobacteria*,

*Bacteroidetes*, *Proteobacteria*, *Verrucomicrobia* и микромицеты родов *Ascomycota*, *Basidiomycota*, *Chytridiomycota*, *Rozellomycota*, *Unassigned* (Xu et al., 2023). Кроме того, почвенная микробиота представляет собой еще одну из форм накопления углерода в почве. Для формирования заключения о распределении углерода в разных слоях почвы важно оценивать различные пулы.

С февраля 2021 года в Российской Федерации в рамках реализации национального плана мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата осуществляется программа по созданию карбоновых полигонов. Она включает в себя исследования, направленные на оценку интегральных значений углеродного баланса для разных типов экосистем, что в дальнейшем позволит рассчитать углеродный след для отдельных субъектов Российской Федерации и страны в целом (Карбоновые полигоны РФ).

Целью данной работы было оценить запасы углерода в почве на территории карбонового полигона «Карбон – Поволжье».

### Материалы и методы исследования

Пробы для исследования были отобраны на лесном участке «Обсерватория» полигона «Карбон – Поволжье», который расположен в Зелено-

дольском районе Республики Татарстан. Координаты: 55.843215, 48.798640 (рис. 1).

Растительность полигона типична для Приказанского региона и представляет собой различные сукцессионные стадии коренных хвойно-широколиственных подтаежных и неморальных широколиственных лесов. Основная часть фитоценозов – липняки волосистоосоковые (70%), включающие в себя различные вариации обилия других пород, в числе которых ель финская, сосна обыкновенная, дуб черешчатый, береза повислая, осина дрожащая. Около 15% территории полигона занимают березняки неморальнотравяные с липой. Кроме того, на участке встречаются еловые подтаежные леса с большим количеством папоротников. Довольно большие площади занимают старовозрастные посадки лиственницы.

В общей сложности на рассматриваемой территории выявлено 8 типов сообществ. Зафиксирован 91 вид растений, относящихся к 70 родам и 46 семействам, что составляет 5.7% от всей флоры Республики Татарстан. Высокую встречаемость (от 25% до 50%) имеют 17 видов. Остальные виды отличаются низкой встречаемостью (менее 25%), они неравномерно распределены на исследуемой территории. Наибольшей встречаемостью обладают липа сердцевидная (*Tilia*

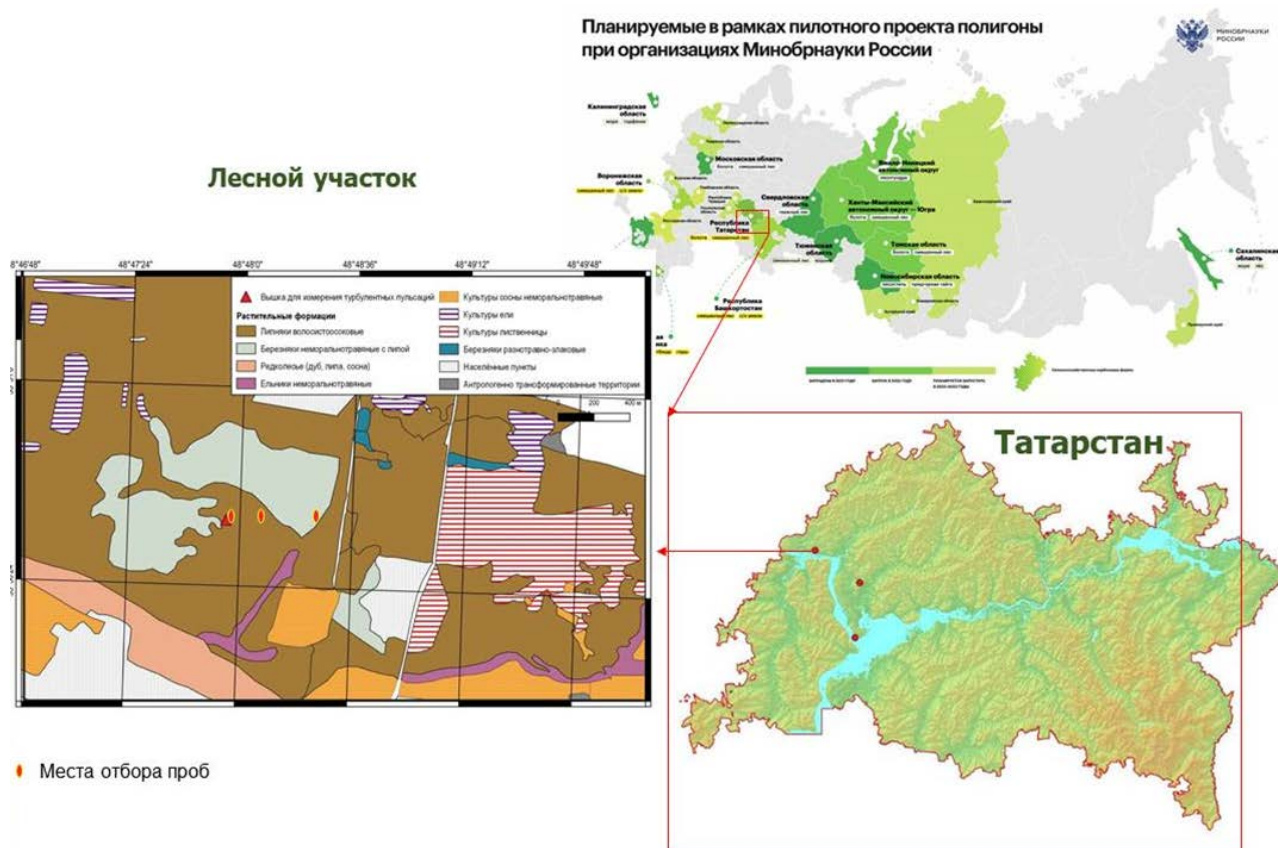


Рис. 1. Карбоновый полигон «Карбон – Поволжье»  
Fig. 1. Carbon polygon «Carbon – Povolzhye»

*cordata* Mill.) (97%), клен платановидный (*Acer platanoides* L.) (87.9%), сныть обыкновенная (*Aegopodium podagraria* L.) (75.8%).

Почвенный покров участка представлен дерново-подзолистыми почвами.

Почвенные разрезы (рис. 1) были заложены в июне 2023 г.: разрезы 1 и 2 в липняке волосисто-осоковом, разрез 3 – в березняке неморальнотравяном с липой.

Отбор проб почв производился в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017 и ГОСТ 17.4.4.02-2017. Пробы почв отбирали по генетическим горизонтам. Из каждого горизонта почвы было отобрано по одной объединенной пробе весом не менее 1 кг. Пробы почвы доставлялись в лабораторию для дальнейшей пробоподготовки (удаление растительных остатков, измельчение, сушка, заморозка). Гранулометрический состав почв определяли в соответствии со стандартом ISO 13220:2020 с использованием лазерного дифрактометра Microtrac Bluewave (Microtrac Retsch GmbH, Германия).

Для определения содержания общего углерода использовали воздушно-сухие пробы почвы, которые хранились при температуре 20°C, для определения численности бактерий и микромицет пробы хранили при -4°C, содержание микробной биомассы определяли в день отбора проб.

Содержание общего углерода ( $C_{\text{общ}}$ ) устанавливалось на термоградиентном анализаторе углерода LECO RC 612 (LECO Instruments, США) согласно ISO 10694:1995. Детекция CO<sub>2</sub> осуществлялась ИК-ячейкой прибора. Содержание углерода в образцах определялось в процессе термического разложения при температуре 450 °C на основании площади пика. В качестве стандартов калибровки использовался карбонат кальция производства LECO (США).

Выделение тотальной ДНК из образцов массой 0.3 г производили с использованием набора FastDNA SpinKi tFor Soil (MP Bio, Germany). Для очищения ДНК применяли QIAquick PCR Purification Kit (Qiagen, Germany). Численность бактериальных и грибных штаммов анализировали методом ПЦР в реальном времени (ISO 17601:2016) с использованием двух пар праймеров: 947f/1349r и ITS1f/ITS2r в амплификаторе BioRad CFX-96 cyclor (BioRad, Munich, Germany) с последовательностями f: AACGCGAAGAACCTTAC, r: CGGTGTGTACAAGGCCCGGGAACG (для бактерий) и f: TCCGTAGGTGAACCTGCGG, r: GCTGCGTTCTTCATCGATGC (для микромицет). Для амплификации использовали следующую программу: первичная денатурация при 95°C в течение 5 минут, далее 39 трехступенчатых циклов

при 62-60°C в течение 45 секунд, при 95°C в течение 15 секунд, и при 72°C в течение 30 секунд. Рабочий раствор для амплификации имел следующий состав (25 мкл): матричная ДНК – 1 мкл, праймеры (10 мкМоль) – по 0.5 мкл, dNTP (10 мМоль) – 2.5 мкл, TaqBuffer (10X) – 2.5 мкл, MgCl<sub>2</sub> (25 мМоль) – 2.5 мкл, Taq polymerase (5 ед./мкл) – 0.2 мкл и ddH<sub>2</sub>O – 15.3 мкл. Для построения калибровочных кривых использовали бактерию *Pseudomonas putida* и микромицет *Penicillium notatum*.

Микробную биомассу ( $C_{\text{мик}}$ ) определяли методом субстрат-индуцированного дыхания согласно ISO 14240-1:1997 (Part 1). К навеске почвы массой 1 г добавляли 10 мг D-глюкозы в качестве легкодоступного питательного субстрата помещали в хроматографическую вials и инкубировали в течение 24 суток при температуре 20°C, увеличение концентрации CO<sub>2</sub> детектировали на капиллярной колонке Rt-Q-BOND 30 m с диаметром 0.53 мм и толщиной слоя нанесённой фазы 20 мкм. Скорость потока составляла 10 мл/мин, объём впрыска – 10 мкл, общее время измерения составляло 5 минут на образец.

Анализ запасов почвенного углерода проводили согласно методике количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов, утвержденной Приказом Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 27.05.2022 №371 в модификации. Пересчет на запас углерода почвы производился с учетом объемной массы почвы (г/см<sup>3</sup>) по формуле:

$$C_{\text{почва}} = C_{\text{общ}} \cdot H \cdot V$$
, где  
 $C_{\text{почва}}$  – запас углерода в пуле почвы, т С/га;  
 $C_{\text{общ}}$  – содержание общего углерода в образце почвы, %;

$H$  – мощность слоя (горизонта) почвы, см;

$V$  – объемная масса почвы, г/см<sup>3</sup>.

Объемная масса почвы была взята из литературных источников для подтипа дерново-подзолистых почв (Завьялова и др., 2018).

Все измерения проводились не менее чем в трехкратной повторности. Статистическую обработку полученных результатов проводили в программе MS Excel. На графиках представлены средние значения, в таблицах приведены средние значения и стандартные ошибки. Для оценки значимости различий использовали критерий Фишера при  $\alpha = 0.05$ .

### Результаты и их обсуждение

Дерново-подзолистые почвы карбонового полигона (табл. 1) отличаются маломощная (2–5 мм) подстилка, которая представлена растительным

Таблица 1. Морфологическое описание почвенных разрезов  
Table 1. Morphological description of soil profile

| Разрез 1<br>Soil section 1    |                                |                                                                                                                                                              | Разрез 2<br>Soil section 2    |                                |                                                                                                                                                              | Разрез 3<br>Soil section 3    |                                |                                                                                                                                                           |
|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Горизонт<br>Horizon           | Глубина,<br>см<br>Depth,<br>cm | Морфологические признаки<br>Morphological characteristics                                                                                                    | Горизонт<br>Horizon           | Глубина,<br>см<br>Depth,<br>cm | Морфологические признаки<br>Morphological characteristics                                                                                                    | Горизонт<br>Horizon           | Глубина,<br>см<br>Depth,<br>cm | Морфологические признаки<br>Morphological characteristics                                                                                                 |
| A <sub>0</sub>                | 0-1                            | Листовой опад                                                                                                                                                | A <sub>0</sub>                | 0-1                            | Листовой опад                                                                                                                                                | A <sub>0</sub>                | 0-1                            | Листовой опад                                                                                                                                             |
| A <sub>1</sub>                | 1-20                           | Темно-серый, влажноватый, супесчаный, насыщен корнями, комковато-пылеватый, мягкий, рыхлый, переход незаметный                                               | A <sub>1</sub>                | 1-20                           | Темно-серый, влажноватый, супесчаный, насыщен корнями, комковато-пылеватый, мягкий, рыхлый, переход незаметный                                               | A <sub>1</sub>                | 1-10                           | Темно-серый, влажноватый, супесчаный, насыщен корнями, комковато-пылеватый, мягкий, переход незаметный                                                    |
| A <sub>1</sub> A <sub>2</sub> | 20-35                          | Серо-белесый, окрашен неравномерно, с белесо-серыми пятнами, единичные корни, влажноватый, супесчаный, комковато-пылеватый, твердоватый, переход постепенный | A <sub>1</sub> A <sub>2</sub> | 20-37                          | Серо-белесый, окрашен неравномерно, с белесо-серыми пятнами, единичные корни, влажноватый, супесчаный, комковато-пылеватый, твердоватый, переход постепенный | A <sub>1</sub> A <sub>2</sub> | 10-37                          | Серо-белесый, окрашен неравномерно, с белесо-серыми пятнами, единичные корни, влажноватый, супесчаный, прочнокомковатый, твердоватый, переход постепенный |
| A <sub>2</sub>                | 35-48                          | Светло-серый, влажноватый, супесчаный, плитчатый, твердоватый, переход заметный                                                                              | A <sub>2</sub>                | 37-70                          | Светло серый, влажноватый, супесчаный, плитчатый, твердоватый, переход заметный                                                                              | A <sub>2</sub>                | 37-52                          | Светло серый, влажноватый, супесчаный, плитчатый, твердоватый, переход заметный                                                                           |
| B                             | 48-90                          | Желтый, влажноватый, супесчаный, твердоватый                                                                                                                 | B <sub>1</sub>                | 70-100                         | Желтый, влажноватый, супесчаный, бесструктурный, твердоватый, переход постепенный                                                                            | B <sub>1</sub>                | 52-80                          | Желтый, влажноватый, супесчаный, твердоватый, бесструктурный, переход постепенный                                                                         |
|                               |                                |                                                                                                                                                              | B <sub>2</sub>                | 100-130                        | Желтый, влажноватый, супесчаный, бесструктурный, твердоватый                                                                                                 | B <sub>2</sub>                | 80-100                         | Желтый, влажноватый, супесчаный, бесструктурный, твердоватый                                                                                              |

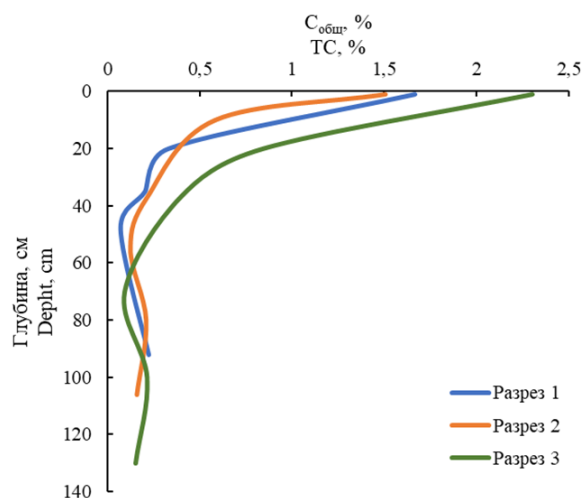


Рис. 2. Распределение содержания общего углерода ( $C_{общ}$ ) в профиле почв  
Fig. 2. Distribution of total carbon content in soil profile

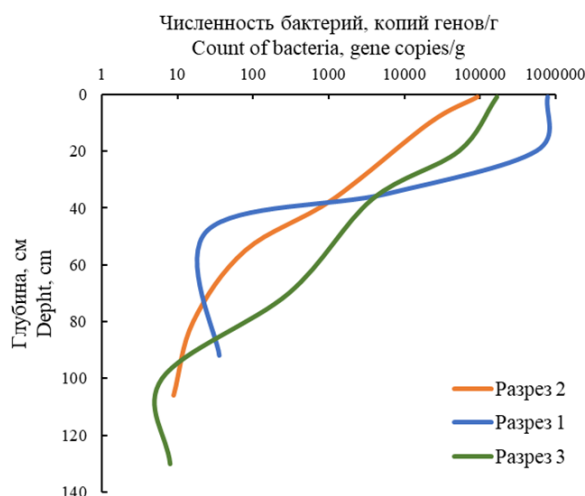


Рис. 3. Распределение численности бактерий в профиле почв  
Fig. 3. Distribution of soil bacteria number in soil profile

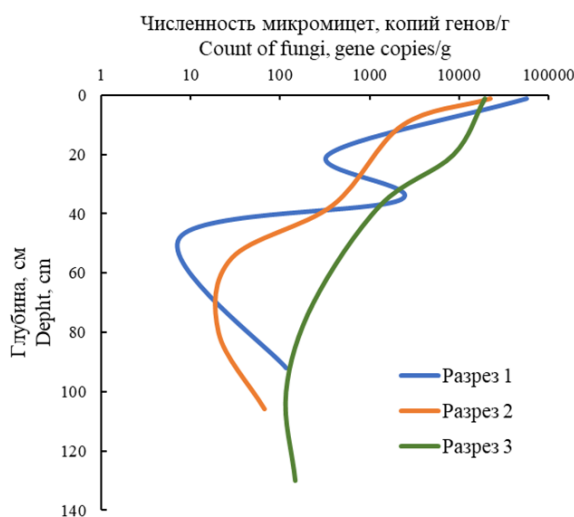


Рис. 4. Распределение численности микромицет в профиле почв  
Fig. 4. Distribution of micromycetes number in soil profile

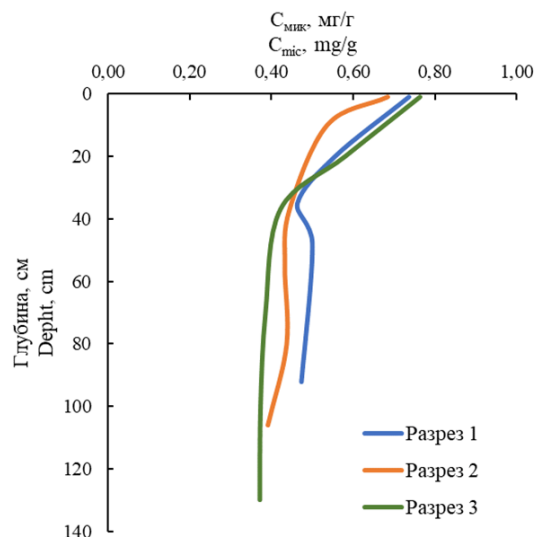


Рис. 5. Распределение микробной биомассы в профиле почв  
Fig. 5. Distribution of microbial biomass in soil profile

опадом разной степени разложения.

Максимальное содержание общего углерода отмечено в горизонте  $A_1$  (1.51-2.30%), минимальное – в горизонте  $A_2$  (0.07-0.12%). При этом содержание  $C_{общ}$  в горизонтах  $A_1A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  достоверно не изменялось и составляло 0.15-0.39%. Наиболее выраженное снижение содержания  $C_{общ}$  было отмечено при переходе от горизонта  $A_1$  к горизонту  $A_1A_2$  – на 61-80% (рис. 2).

Аналогичные показатели при определении содержания  $C_{общ}$  в дерново-подзолистых почвах Республики Татарстан были получены Д.В. Ивановым и А.Б. Александровой (2022): содержание

гумуса в верхнем горизонте почв достигало 2.0-4.5% и также снижалось с глубиной. Содержание  $C_{общ}$  в слое 0-20 см дерново-подзолистой почвы под лесами на территории Вологодской и Костромской областей варьировало от 0.9 до 6.5% (Кудреватых и др., 2021).

Наибольшая численность бактерий наблюдалась в горизонте  $A_1$  (от  $7.72 \cdot 10^5$  до  $9.15 \cdot 10^4$  копий генов/г) и снижалась с глубиной примерно так же, как и содержание гумуса (рис. 3). В горизонтах  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  численность бактерий составляла от 6 до 77 копий генов/г.

Общая тенденция снижения численности с

увеличением глубины установлена и для микромицет. Так, от горизонта  $A_1$  к горизонту  $A_1A_2$  количество микромицет сократилось с  $1.96 \cdot 10^4 - 5.74 \cdot 10^4$  копий генов/г до  $3.46 \cdot 10^2 - 8.67 \cdot 10^3$  копий генов/г. На глубине 40–130 см численность микромицет достоверно не изменялась и составляла 21–235 копий генов/г.

Разрез 3 по сравнению с двумя другими разрезами характеризовался большей численностью микромицет. В разрезе 1 их численность сократилась с  $5.74 \cdot 10^4$  копий генов/г в горизонте  $A_1$  до  $3.46 \cdot 10^2$  копий генов/г в горизонте  $A_1A_2$ , а далее в горизонте  $A_2$  она вновь возросла до  $2.29 \cdot 10^3$  копий генов/г. Однако статистический анализ показал отсутствие достоверных различий между горизонтами по этому показателю ( $\alpha < 0.05$ ). Схожие результаты изменения численности микромицет в почвах с глубиной были получены в целом ряде исследований (Ekelund et al., 2001; Liu et al., 2013; Neville et al., 2002; Xue et al., 2023).

Максимальное содержание углерода микробной массы ( $C_{\text{мик}}$ ) также характерно для горизонта  $A_1$  – 0.69–0.76 мг/г. Максимальное ее снижение наблюдается в пределах верхних 40 см – на 22–25%. Стоит отметить, что для разреза 1 установлено увеличение содержания  $C_{\text{мик}}$  в горизонте  $A_2$  до 0.50 мг/г. В горизонтах  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  содержание  $C_{\text{мик}}$  достоверно не изменяется и варьирует в диапазоне 0.37–0.50 мг/г. Снижение микробной биомассы в зависимости от глубины описано во многих работах (Naylor et al., 2022; Chen et al., 2022; Xu et al., 2021). Аналогичный диапазон содержания  $C_{\text{мик}}$  (0.20–0.80 мг/г) в слое 0–20 см характерен для дерново-подзолистых почв лесов Вологодской и Костромской областей (Кудреватых и др., 2021). В работе Е.А. Сусьяна (Сусьян и др., 2009) также было зафиксировано снижение  $C_{\text{мик}}$  в лесных почвах с глубиной: от верхнего горизонта к нижнему значение показателя уменьшалось почти в 2 раза.

Запасы общего и микробного углерода в почвах полигона рассчитывали для слоев 0–30 см, 30–50 см, 50–100 см, 0–100 см в соответствии с «Методикой количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов» (Приказ Минприроды РФ от 27.05.2022 №371).

Максимальные запасы общего углерода содержатся в верхнем 30-см слое, объединяющем горизонт  $A_1$  и  $A_1A_2$ , и составляют  $32.36 \pm 13.45$  т/га, из которых 7% приходится на углерод микробной биомассы ( $2.29 \pm 0.21$  т/га). С глубиной запасы углерода закономерно снижаются. Согласно данным классификации запасов углерода в почвах, приведенной в Национальном атласе почв Российской Федерации (2011), рассчитанный запас углерода в слое почвы 0–100 см на территории карбонового полигона «Карбон – Поволжье» оценивается как низкий.

В слое 0–30 см содержится 67% от запасов общего и 29% микробного углерода. При этом запас углерода в нижних слоях почвы (30–100 см) также достаточно высок 15.7 т/га, поскольку углерод в них подвергается меньшей минерализации. Именно поэтому анализ запасов углерода должен включать исследование всего профиля (Сидорова и др., 2023).

Полученные значения превышают средний показатели запаса углерода для лесных почв Европейской части России (Щепаченко и др., 2013). Однако, более поздние результаты расчета запаса углерода, представленные другими исследователями, совпадают с данными настоящей работы и варьируются в диапазоне 30–60 т/га (Чернова и др., 2021; Завьялова, 2022; Кулагина и др., 2023). В работе А.Б. Александровой (Александрова и др., 2015) запас гумуса в слое 0–20 см дерново-подзолистых пахотных почв Республики Татарстан оценен в 22–57 т/га. Оценки запасов углерода в почвах лесных экосистем Татарстана (Ива-

Таблица 2. Распределение запасов почвенного углерода по глубине на территории карбонового полигона «Карбон – Поволжье»

Table 2. Distribution of soil carbon deposits by depth on the territory of the carbon polygon «Carbon – Povolzhye»

| Глубина, см<br>Depth, cm | Общий углерод, т/га<br>Total carbon, t/ha | Микробный углерод, т/га<br>Microbial biomass, t/ha |
|--------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 0–30                     | $32.36 \pm 13.45$                         | $2.29 \pm 0.21$                                    |
| 30–50                    | $4.78 \pm 1.15$                           | $1.05 \pm 0.11$                                    |
| 50–100                   | $10.92 \pm 0.97$                          | $1.55 \pm 0.74$                                    |
| 0–100                    | $48.06 \pm 13.86$                         | $4.89 \pm 1.13$                                    |

нов, Александрова, 2022) показывают, что для слоя 0–30 см дерново-подзолистых супесчаных почв характерно содержание углерода на уровне 45 т/га, а в слое 0–100 см – 53 т/га.

### Заключение

Установлено, что почва на территории карбонового полигона «Карбон – Поволжье» относится к дерново-подзолистым, имеет характерное для данных почв распределение горизонтов, содержание общего и микробного углерода, численность бактерий и микромицет. Показано, что с увеличением глубины снижается содержание общего и микробного углерода, содержание бактерий и микромицет, а также респираторная активность. Максимальное снижение оцененных показателей установлено от горизонта  $A_1$  к горизонту  $A_2$  (при переходе с 0 до 35–54 см), при этом максимальное уменьшение отмечено для численности бактерий на 98–99%, минимальное для  $C_{\text{мик}}$  на 35–45%. Суммарный запас общего углерода в слое 0–100 см составил  $48,05 \pm 13,86$  т/га, запас микробного углерода  $4,89 \pm 1,13$  г/га. Несмотря на низкие концентрации общего и органического углерода в горизонтах  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  вклад данных горизонтов в общий запас составил 22–40% и 51–58%, соответственно, что обусловлено достаточно большой мощностью этих горизонтов (44–60 см). Таким образом, для оценки запасов углерода и дальнейшего расчета его баланса для каждого типа экосистемы необходимо учитывать запас углерода не только в верхнем слое, но и распределение его по профилю.

### Список литературы

1. Александрова А.Б., Иванов Д.В., Маланин В.В., Хасанов Р.Р., Марасов А.А., Паймикина Э.Е., Рупова Э.Х. Динамика содержания гумуса и его запасов в почвах Республики Татарстан // Российский журнал прикладной экологии. 2015. №3. С. 13–17.
2. Бакаева З.М., Замолодчиков Д.Г. Запасы и потоки углерода в лесах Северного Кавказа // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский Регион. Естественные науки. 2009. №5. С. 78–87.
3. ГОСТ 17.4.3.01-2017. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб.
4. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа.
5. Завьялова Н. Е. Васбиева М.Т., Фомин Д.С., Тетерлев И.С. Морфолого-генетическая характеристика профиля дерново-подзолистой почвы смешанного леса Предуралья // Известия ОГАУ. 2018. №2. С. 99–101.
6. Завьялова Н.Е. Углеродпротекторная емкость дерново-подзолистой почвы естественных и агроэкосистем Предуралья // Почвоведение. 2022. №8. С. 1046–1055. doi: 10.31857/S0032180X22080160.
7. Иванов Д.В., Александрова А.Б. Предварительные оценки запасов углерода в почвах лесных экосистем Республики Татарстан // Российский журнал прикладной экологии. 2022. №2. С. 56–60. doi: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.2.56.60>.
8. Карбоновые полигоны Российской Федерации (2021). // URL: <https://carbon-polygons.ru> (дата обращения 12.09.2023).
9. Кудреватых И.Ю., Ананьева Н.Д., Сушко С.В., Иванищева Е.А. Химические и микробиологические свойства дерново-подзолистой почвы в лесах вологодской и костромской областей // Лесоведение. 2021. №1. С. 93–106. doi: 10.31857/S002411482101006X
10. Кулагина В.И., Александрова А.Б., Рязанов С.С., Шагидуллин Р.Р., Андреева А.А., Кольцова Т.Г. Запасы органического углерода в почвах Раифского участка Волжско-Камского заповедника // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия. 2023. №1. С. 143–158.
11. Ларионов Ю.С. Роль углерода и круговороты на его основе как предпосылки совершенствования системы мониторинга плодородия почв // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2019. С. 124–134. doi: 10.33764/2618-981.
12. Национальный атлас почв Российской Федерации. М.: Астрель:АСТ, 2011. 632 с.
13. Прянишникова Д.Н., Семенов В.М., Лебедева Т.Н. Проблема углерода в устойчивом земледелии: агрохимические аспекты // Агрохимия. 2015. №11. С. 3–12.
14. Сидорова В.А., Юркевич М.Г., Бахмет О.Н. Моделирование вертикального распределения содержания углерода в почвах при разных типах землепользования // Международный сельскохозяйственный журнал. 2023. №2. С. 192–196. doi: 10.55186/25876740.
15. Сорокин Н.Д., Александров Д.Е. Микробиологическая трансформация углерода и азота в лесных почвах Средней Сибири // Вестник КрасГАУ. 2013. №61. С. 74–78. doi: 10.33764/2618-981.
16. Сусьян Е.А., Ананьева Н.Д., Гавриленко Е.Г., Чернова О.В., Бобровский М.В. Углерод микробной биомассы в профиле лесных почв южной тайги // Почвоведение. 2009. №10. С. 1233–1240.
17. Чернова О.В., Голозубов О.М., Алябина И.О., Щепашенко Д.Г. Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2021. №3. С. 273–286. doi: 10.31857/S0032180X21030047.
18. Чимитдоржиева Э.О. Запасы углерода в постагрогенных сухостепных почвах западного Забайкалья // Аридные экосистемы. 2017. №3. С. 59–65.
19. Щепашенко Д.Г., Мухоморова Л.В., Швиденко А.З., Ведрова Э.Ф. Запасы органического углерода в почвах России // Почвоведение. 2013. №2. С. 123–132.
20. Batjes N.H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world // European journal of soil science. 1996, Vol. 47. № 3. P. 151–163 doi: [doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x).
21. Chappell A., Baldock J., Sanderman J. The global significance of omitting soil erosion from soil organic carbon cycling schemes // Nature climate change. 2015. Vol. 6. P. 187–191. doi: 10.1038/nclimate2829.
22. Chen X., Feng J., Ding Z., Tang M., Zhu B. Changes in soil total, microbial and enzymatic C-N-P contents and stoichiometry with depth and latitude in forest ecosystems // Science of the total environment. 2022. Vol. 816. P. 1–10. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151583.
23. Ekelund F., Ronn R., Christensen S. Distribution with depth of protozoa, bacteria and fungi in soil profiles from three Danish forest sites // Soil biology and biochemistry. 2001. Vol. 33. P. 475–481. doi: 10.1016/S0038-0717(00)00188-7.
24. He Q., Wu Y., Wang J., Bing H. Community rRNA operon copy number of soil bacteria decreases with soil depth

and ecosystem succession in postglacial ecosystems // Applied soil ecology. 2023. Vol. 186. P. 1–4. doi: 10.1016/j.apsoil.2023.104817.

25. ISO 10694:1995. Soil quality. Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis).

26. ISO 16072:2002. Soil quality. Laboratory methods for determination of microbial soil respiration.

27. ISO 17601:2016. Soil quality. Estimation of abundance of selected microbial gene sequences by quantitative PCR from DNA directly extracted from soil.

28. Liao Q., Lu C., Yuan F., Fan Q., Chen H., Yang L. Soil carbon-fixing bacterial communities respond to plant community change in coastal salt marsh wetlands // Applied soil ecology. 2023. Vol. 189. P. 1–10. doi: 10.1016/j.apsoil.2023.104918.

29. Liu R.J., Li Y., Diao Z.K., Li M., Lin X.G. Effects of soil depth and season variation on community structure of arbuscular mycorrhizal fungi in greenhouse soils planted with watermelon // Pedosphere. 2013. Vol. 23. P. 350–358. doi: 10.1016/S1002-0160(13)60026-0.

30. Mason A.R.G., Salomon M.J., Lowe A.J., Cavagnaro T.R. Microbial solutions to soil carbon sequestration // Journal of cleaner production. 2023. Vol. 417. P. 1–10. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137993.

31. Naylor D., McClure R., Jansson J. Trends in microbial community composition and function by soil depth // Microorganisms. 2022. Vol. 10. P. 1–26. doi: 10.3390/microorganisms10030540.

32. Neville J., Tessier J. L., Morrison I., Scarratt J., Canning B., Klironomos J.N. Soil depth distribution of ecto- and arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Populus tremuloides* within a 3-year-old boreal forest clear-cut // Applied soil ecology. 2002. Vol. 19. P. 209–216. doi: 10.1016/S0929-1393(01)00193-7.

33. Wang Y., Li C., Hu S. Land use effects on the dynamics of soil carbon, nitrogen and microbes in the water-wind erosion crisscross region of the northern Loess Plateau // Pedosphere. 2023. Vol. 33. P. 1–17. doi: 10.1016/j.pedsph.2023.03.019.

34. Xu T., Chen X., Hou Y. et al. Side effects of 58 years of copper sulphate treatment of the Fairmount lakes, Minnesota // Plant and soil. 2021. Vol. 459. P. 137–153. doi: 10.1007/s11104-020-04712-z.

35. Xu T., Shen Y., Ding Z., Zhu B. Seasonal dynamics of microbial communities in rhizosphere and bulk soils of two temperate forests // Rhizosphere. 2023. Vol. 25. P. 1–9. doi: 10.1016/j.rhisph.2023.100673.

36. Xue P., Minasny B., McBratney A., Jiang Y., Luo Y. Land use effects on soil protists and their top-down regulation on bacteria and fungi in soil profiles // Applied soil ecology. 2023. Vol. 185. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.apsoil.2022.104799.

## References

1. Aleksandrova A.B., Ivanov D.V., Malanin V.V., Hasanov R.R., Marasov A.A., Pajmikhina E.E., Rupova E.H. Dinamika soderzhaniya gumusa i ego zapasov v pochvah Respubliki Tatarstan [Dynamics of humus content and its reserves in the soils of the Republic of Tatarstan] // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2015. No 3. P. 13–17.

2. Bakaeva Z.M., Zamolodchikov D.G. Zapasy i potoki ugleroda v lesah Severnogo Kavkaza [Carbon stocks and flows in the forests of the North Caucasus] // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Severo-Kavkazskij Region. Estestvennye nauki [News of higher educational institutions. North Caucasus Region. Natural Sciences.]. 2009. No 5. P. 78–87.

3. GOST 17.4.3.01-2017. Ohrana prirody. Pochvy. Obshchie trebovaniya k otboru prob [Nature Protection. Soils. General sampling requirements].

4. GOST 17.4.4.02-2017. Metody otbora i podgotovki prob dlya himicheskogo, bakteriologicheskogo, gel'mintologicheskogo analiza [Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis].

5. Zav'yalova N. E. Vasbieva M.T., Fomin D.S., Teterlev I.S. Morfologo-geneticheskaya harakteristika profilya derno-podzolistoj pochvy smeshannogo lesa Predural'ya [Morphological and genetic characteristics of the profile of soddy-podzolic soil in a mixed forest in the Cis-Ural region] // Izvestiya OGAU [News of the Orenburg Agrarian University]. 2018. No 2. P. 99–101.

6. Zav'yalova N.E. Uglerodprotektornaya emkost' derno-podzolistoj pochvy estestvennykh i agroekosistem Predural'ya [Carbon protective capacity of sod-podzolic soil of natural and agroecosystems of the Cis-Urals] // Pochvovedenie [Soil science]. 2022. No 8. P. 1046–1055. doi: 10.31857/S0032180X22080160.

7. Ivanov D.V., Aleksandrova A.B. Predvaritel'nye ocenki zapasov ugleroda v pochvah lesnykh ekosistem respubliky Tatarstan [Preliminary estimates of carbon reserves in soils of forest ecosystems of the Republic of Tatarstan] // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2022. No 2. P. 56–60. doi: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.2.56.60>.

8. Karbonovye poligony Rossijskoj Federacii [Carbon polygons of the Russian Federation] (2021). // URL: <https://carbon-polygons.ru> (data obrashcheniya 12.09.2023).

9. Kudrevatykh I.YU., Anan'eva N.D., Sushko S.V., Ivanishcheva E.A. Himicheskie i mikrobiologicheskie svoystva derno-podzolistoj pochvy v lesah vologodskoj i kostromskoj oblastej [Chemical and microbiological properties of sod-podzolic soil in the forests of the Vologda and Kostroma regions] // Lesovedenie [Fofestry]. 2021. No 1. P. 93–106. doi: 10.31857/S002411482101006X.

10. Kulagina V.I., Aleksandrova A.B., Ryazanov S.S., SHagidullin R.R., Andreeva A.A., Kol'cova T.G. Zapasy organicheskogo ugleroda v pochvah Raifskogo uchastka Volzhsko-Kamskogo zapovednika [Organic carbon reserves in soils of the Raifa section of the Volga-Kama Nature Reserve] // Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Biologiya. Himiya [Scientific notes of the Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky. Biology. Chemistry.]. 2023. No 1. P. 143–158.

11. Larionov Yu.S. Rol' ugleroda i krugovoroty na ego osnove kak predposylki sovershenstvovaniya sistemy monitoringa plodorodiya pochv [The role of carbon and cycles based on it as a prerequisite for improving the soil fertility monitoring system] // Interekspo Geo-Sibir'. 2019. P. 124–134. doi: 10.33764/2618-981.

12. Nacional'nyj atlas pochv Rossijskoj Federacii [National soil atlas of the Russian Federation]. Moscow: Astrel':AST, 2011. 632 p.

13. Pryanishnikova D.N., Semenov V.M., Lebedeva T.N. Problema ugleroda v ustojchivom zemledelii: agrohimicheskie aspekty [The problem of carbon in sustainable agriculture: agrochemical aspects] // Agrohimiya [Agrochemistry]. 2015. No 11. P. 3–12.

14. Sidorova V.A., Yurkevich M.G., Bahmet O.N. Modelirovanie vertikal'nogo raspredeleniya soderzhaniya ugleroda v pochvah pri raznykh tipakh zemlepol'zovaniya [Modeling of the vertical distribution of carbon content in soils under different types of land use] // Mezhdunarodnyj sel'skohozyajstvennyj zhurnal [International Agricultural journal]. 2023. No 2. P. 192–196. doi: 10.55186/25876740.

15. Sorokin N.D., Aleksandrov D.E. Mikrobiologicheskaya transformaciya ugleroda i azota v lesnykh pochvah Srednej Sibiri [Microbiological transformation of carbon and nitrogen in forest soils of Central Siberia] // Vestnik KrasGAU [Bulletin of

Krasnoyarsk state agrarian university]. 2013. No 61. P. 74–78. doi 10.33764/2618-981.

16. Sus'yan E.A., Anan'eva N.D., Gavrilenko E.G., Chernova O.V., Bobrovskij M.V. Uglerod mikrobnj biomassy v profile lesnyh pochv yuzhnoj tajgi [Carbon of microbial biomass in the profile of forest soils of the southern taiga] // *Pochvovedenie* [Soil science]. 2009. No 10. P. 1233–1240.

17. Chernova O.V., Golozubov O.M., Alyabina I.O., Shchepashchenko D.G. Kompleksnyj podhod k kartograficheskoj ocenke zapasov organicheskogo ugleroda v pochvah Rossii [An integrated approach to the cartographic assessment of organic carbon reserves in Russian soils] // *Pochvovedenie* [Soil science]. 2021. No 3. P. 273–286. doi 10.31857/S0032180X21030047.

18. Chimitdorzhieva E.O. Zapasy ugleroda v postagrogennyh suhostepnyh pochvah zapadnogo Zabajkal'ya [Carbon reserves in postagrogenic dry steppe soils of western Transbaikalia] // *Aridnye ekosistemy* [Arid ecosystems]. 2017. No 3. P. 59–65.

19. Shchepashchenko D.G., Muhortova L.V., Shvidenko A.Z., Vedrova E.F. Zapasy organicheskogo ugleroda v pochvah Rossii [Organic carbon reserves in Russian soils] // *Pochvovedenie* [Soil science]. 2013. No 2. P. 123–132.

20. Batjes N.H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world // *European journal of soil science*. 1996. Vol. 47. No 3. P. 151–163. doi: doi.org/10.1111/j.1365-2389.1996.tb01386.x.

21. Chappell A., Baldock J., Sanderman J. The global significance of omitting soil erosion from soil organic carbon cycling schemes // *Nature climate change*. 2015. Vol. 6. P. 187–191. doi: 10.1038/nclimate2829.

22. Chen X., Feng J., Ding Z., Tang M., Zhu B. Changes in soil total, microbial and enzymatic C-N-P contents and stoichiometry with depth and latitude in forest ecosystems // *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 816. P. 1–10. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151583.

23. Ekelund F., Ronn R., Christensen S. Distribution with depth of protozoa, bacteria and fungi in soil profiles from three Danish forest sites // *Soil biology and biochemistry*. 2001. Vol. 33. P. 475–481. doi: 10.1016/S0038-0717(00)00188-7.

24. He Q., Wu Y., Wang J., Bing H. Community rRNA operon copy number of soil bacteria decreases with soil depth and ecosystem succession in postglacial ecosystems // *Applied soil ecology*. 2023. Vol. 186. P. 1–4. doi: 10.1016/j.apsoil.2023.104817.

25. ISO 10694:1995. Soil Quality. Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis).

26. ISO 16072:2002. Soil quality. Laboratory methods for determination of microbial soil respiration.

27. ISO 17601:2016. Soil quality. Estimation of abundance of selected microbial gene sequences by quantitative PCR from DNA directly extracted from soil.

28. Liao Q., Lu C., Yuan F., Fan Q., Chen H., Yang L. Soil carbon-fixing bacterial communities respond to plant community change in coastal salt marsh wetlands // *Applied soil ecology*. 2023. Vol. 189. P. 1–10. doi: 10.1016/j.apsoil.2023.104918.

29. Liu R.J., Li Y., Diao Z.K., Li M., Lin X.G. Effects of soil depth and season variation on community structure of arbuscular mycorrhizal fungi in greenhouse soils planted with watermelon // *Pedosphere*. 2013. Vol. 23. P. 350–358. doi: 10.1016/S1002-0160(13)60026-0.

30. Mason A.R.G., Salomon M.J., Lowe A.J., Cavnagaro T.R. Microbial solutions to soil carbon sequestration // *Journal*

of cleaner production. 2023. Vol. 417. P. 1–10. doi: 10.1016/j.jclepro.2023.137993.

31. Naylor D., McClure R., Jansson J. Trends in microbial community composition and function by soil depth // *Microorganisms*. 2022. Vol. 10. P. 1–26. doi: 10.3390/microorganisms10030540.

32. Neville J., Tessier J. L., Morrison I., Scarratt J., Canning B., Klironomos J.N. Soil depth distribution of ecto- and arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Populus tremuloides* within a 3-year-old boreal forest clear-cut // *Applied soil ecology*. 2002. Vol. 19. P. 209–216. doi: 10.1016/S0929-1393(01)00193-7.

33. Wang Y., Li C., Hu S. Land use effects on the dynamics of soil carbon, nitrogen and microbes in the water-wind erosion crisscross region of the northern Loess Plateau // *Pedosphere*. 2023. Vol. 33. P. 1–17. doi: 10.1016/j.pedsph.2023.03.019

34. Xu T., Chen X., Hou Y. et al. Side effects of 58 years of copper sulphate treatment of the Fairmount lakes, Minnesota // *Plant and soil*. 2021. Vol. 459. P. 137–153. doi: 10.1007/s11104-020-04712-z.

35. Xu T., Shen Y., Ding Z., Zhu B. Seasonal dynamics of microbial communities in rhizosphere and bulk soils of two temperate forests // *Rhizosphere*. 2023. Vol. 25. P. 1–9. doi: 10.1016/j.rhisph.2023.100673.

36. Xue P., Minasny B., McBratney A., Jiang Y., Luo Y. Land use effects on soil protists and their top-down regulation on bacteria and fungi in soil profiles // *Applied soil ecology*. 2023. Vol. 185. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.apsoil.2022.104799.

---

### Alexandrova L., Gordeev A.S., Babichuk V.R., Kuryntseva P.A., Selivanovskaya S.Yu. **The estimation of carbon content in soil on the territory of the carbon polygon «Carbon – Povolzhye».**

An understanding of the accumulation of carbon in different pools, in particular in the soil, is necessary if we aim to develop technologies for reducing greenhouse gas emissions. We studied the content of total and microbial carbon, the number of bacteria and micromycetes for each soil horizon when establish the carbon reserve in the soil on the territory of the «Carbon – Povolzhye» carbon polygon. The carbon polygon «Carbon – Povolzhye» is located on soddy-podzolic soils with a typical distribution of horizons. With increasing depth the total carbon content (by 87–93%) and microbial carbon content (by 43–51%), the count of bacteria (by 99%) and the count of fungi (by 99%) decreased. The calculated total soil organic carbon stock was  $48.05 \pm 13.86$  t/ha, the stock of microbial carbon was  $4.89 \pm 1.13$  t/ha.

**Keywords:** carbon polygon; soddy-podzolic soils; carbon reserves in soils; total carbon; microbial carbon; Republic of Tatarstan.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

**Информация о статье / Information about the article**

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 17.10.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 02.11.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 21.11.2023

**Сведения об авторах**

Александрова Людмила, студент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская 18, E-mail: LDAleksandrova@stud.kpfu.ru.

Гордеев Александр Сергеевич, научный сотрудник, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская 18, E-mail: drgor@mail.ru.

Бабичук Вячеслав Романович, студент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская 18, E-mail: slavababichuk@gmail.com.

Курынцева Полина Александровна, кандидат биологических наук, доцент, доцент, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская 18, E-mail: polinazwerewa@yandex.ru.

Селивановская Светлана Юрьевна, доктор биологических наук, профессор, директор Института, Казанский Приволжский федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская 18, E-mail: svetlana.selivanovskaya@kpfu.ru.

**Information about the authors**

Ludmila Aleksandrova, Student, Kazan Federal University, 18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: LDAleksandrova@stud.kpfu.ru.

Alexander S. Gordeev, Researcher, Kazan Federal University, 18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: drgor@mail.ru.

Vyacheslav R. Babichuk, Student, Kazan Federal University, 18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: slavababichuk@gmail.com.

Polina A. Kuryntseva, Ph.D. in Biology, Associate Professor, Kazan Federal University, 18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: polinazwerewa@yandex.ru.

Svetlana Yu. Selivanovskaya, D.Sci. in Biology, Professor, Director of the Institute, Kazan Federal University, 18, Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russia, E-mail: svetlana.selivanovskaya@kpfu.ru.

