

УДК 631.417.1

<https://doi.org/10.31251/pos.v7i3.271>

Содержание и запасы органического углерода в почвах залежей лесостепи Южного Предуралья

© 2024 М. А. Комиссаров ^{1,2}, М. М. Айвазян ^{1,2}, И. М. Габбасова ^{1,2}, Т. Т. Гарипов ^{1,2},
Р. Р. Сулейманов ^{1,2}, Н. И. Федоров ^{1,2}, Д. И. Рухович ³

¹Уфимский Институт биологии – обособленное структурное подразделение ФГБНУ Уфимский федеральный исследовательский центр РАН, проспект Октября, 69, г. Уфа, 450054, Россия. E-mail: mkomissarov@list.ru

²ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», ул. Космонавтов, 1, г. Уфа, 450064, Россия

³ФГБНУ ФИЦ «Почвенный Институт им. В.В. Докучаева», Пыжевский пер., д. 7, стр. 2, г. Москва, 119017, Россия

Цель исследования. Анализ содержания и запасов органического углерода в почвах залежей Южного Предуралья при их использовании в качестве сенокосов и пастбищ, а также при зарастании лесом.

Место и время проведения. Российская Федерация, Республика Башкортостан, Мишкинский район, карбоновый полигон «Евразийский», май–октябрь 2023 г.

Методы. С участков 20–25-летних залежей карбонового полигона, занятых березняком, сенокосами и пастбищами, послойно отбирали (через 10 см до глубины 60 см) образцы почв и определяли в них содержание и запасы органического углерода ($C_{орг}$), содержание щелочногидролизуемого азота, подвижного фосфора, обменного калия и реакцию среды.

Основные результаты. В слое 0–30 см серой лесной почвы содержание $C_{орг}$ и под лесом, и на травяной залежи составляет 3,2% (в слое 30–60 см – 1,9%), а его запасы – 94–102 т/га (в слое 0–60 см – 162–179 т/га). В слое 0–30 см темно-серой лесной почвы содержание $C_{орг}$ под березняком составляет 8,8% (в слое 30–60 см – 6,4%), а его запасы – 257 т/га (в слое 0–60 см – 492 т/га). На травяной залежи, используемой в качестве сенокосов и пастбищ, содержание $C_{орг}$ в слое 0–30 см составляет 5,1–5,7%, в слое 30–60 см – 3,9–4,3 %; запасы $C_{орг}$ в слое 0–30 см – 167–187 т/га, в слое 0–60 см – 319–343 т/га.

Заключение. Содержание и запасы $C_{орг}$ в серой лесной почве под травянистыми растительными сообществами в 1,6–1,9 раза меньше, чем в темно-серой лесной; в темно-серой почве содержание и запасы $C_{орг}$ под березняком на 50–70% выше, чем на сенокосах и пастбищах. Таким образом, перевод пахотных почв лесостепи Южного Предуралья в залежь способствовал снижению чрезмерной распаханности территории, прекращению низкорентабельного сельскохозяйственного производства, проявлению тенденции к восстановлению почв до целинных аналогов и снижению эрозийной опасности. Промежуточное по содержанию и запасам органического углерода состояние, занимаемое почвой залежи между пашней и лесом, даёт основание предполагать, что со временем в почвах сенокосов и пастбищ эти показатели могут значительно увеличиться.

Ключевые слова: залежь; органический углерод; березняк; пастбище; сенокос; серые лесные почвы (*Albic Greyic Phaeozems*).

Цитирование: Комиссаров М.А., Айвазян М.М., Габбасова И.М., Гарипов Т.Т., Сулейманов Р.Р., Федоров Н.И., Рухович Д.И. Содержание и запасы органического углерода в почвах залежей лесостепи Южного Предуралья // Почвы и окружающая среда. 2024. Том 7. № 3. e271. DOI: [10.31251/pos.v7i3.271](https://doi.org/10.31251/pos.v7i3.271)

ВВЕДЕНИЕ

В круговороте углерода важную роль играет органическое вещество почв. В нем сосредоточено больше углерода, чем в растениях и атмосфере вместе взятых (Batjes, 1996; Smith, 2008). Общемировые запасы углерода в метровой толще почв планеты исчисляются тысячами гигатонн (Milne et al., 2007; Lal, 2008; Oelkers, Cole, 2008), из которых пятая часть находится на территории РФ (Kurganova et al., 2014). Содержание и запасы углерода в почве определяются сочетанием природных и антропогенных факторов, при этом почвы могут как выделять двуокись углерода в атмосферу вследствие деятельности микроорганизмов и минерализации органического вещества, так и депонировать её в процессе гумусообразования. Считается, что почти 90% двуокиси углерода атмосферы имеет почвенное происхождение (Dalal, Allen, 2008). Поступление диоксида углерода в атмосферу с сельскохозяйственных угодий планеты составляет около 20% от его доли, образующейся при сжигании ископаемого топлива (Федоров и др., 2021). В VI докладе Международной группы

экспертов по изменению климата (Shukla et al., 2022 г.) отмечено, что концентрация CO_2 в атмосфере была настолько высокой последний раз 2 миллиона лет назад.

В зависимости от сельскохозяйственного использования почв может преобладать тот или иной процесс. Так, при вспашке с оборотом пласта увеличивается выделение CO_2 в атмосферу, а при переводе в залежь – возрастает депонирование углерода почвой. В России, вследствие этого, начиная с 90-х годов XX века земледелие из источника C-CO_2 превратилось в накопитель (секвестор) C-CO_2 в размере около 20 млн т C-CO_2 /год (Кудеяров, 2019). Изучению динамики содержания и запасов углерода в почве после вывода значительных площадей пашни из сельскохозяйственного оборота в конце XX века посвящен ряд работ (Люри и др., 2010; Рыжова и др., 2014; Баева и др., 2017; Миллер и др., 2023; Guo, Gifford, 2002; Kalinina et al., 2011). Если бы удалось воплотить в жизнь Международную инициативу «4 промилле», предложенную на Парижском совещании по климату в 2015 г. (Minasny et al., 2017), то это позволило бы компенсировать совокупный годовой антропогенный выброс CO_2 за счёт накопления органического вещества в почве (Столбовой, 2020).

Залежи зачастую используются в качестве естественных кормовых угодий, площадь которых в РФ составляет порядка 88 млн га, с соотношением сенокосов и пастбищ около 1:3. Экологические и экономические аспекты использования залежей подробно рассмотрены в обзоре (Нечаева, 2023). По данным «Доклада о состоянии и использовании земель в Республике Башкортостан» (Доклад ..., 2021) площадь пашни составляет 3659,8 тыс. га (50,0%), сенокосов – 1274,9 тыс. га (17,4%), пастбищ – 2345,3 тыс. га (32,0%). Цель работы – анализ содержания и запасов органического углерода в почвах залежей при их использовании в качестве сенокосов и пастбищ, а также при зарастании лесом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования были почвы участка «Мишкино» карбонового полигона «Евразийский». Проведение полевых исследований и отбор почвенных образцов проводили согласно нормативному стандарту (ГОСТ Р 58595-2019), а также методикам (Абакумов и др., 2022; Курганова и др., 2022), разработанным для изучения органического вещества почв на карбоновых полигонах. Заложение разрезов и отбор образцов проводили в течение вегетационного периода 2023 г. Карта-схема мест их расположения приведена на рисунке.

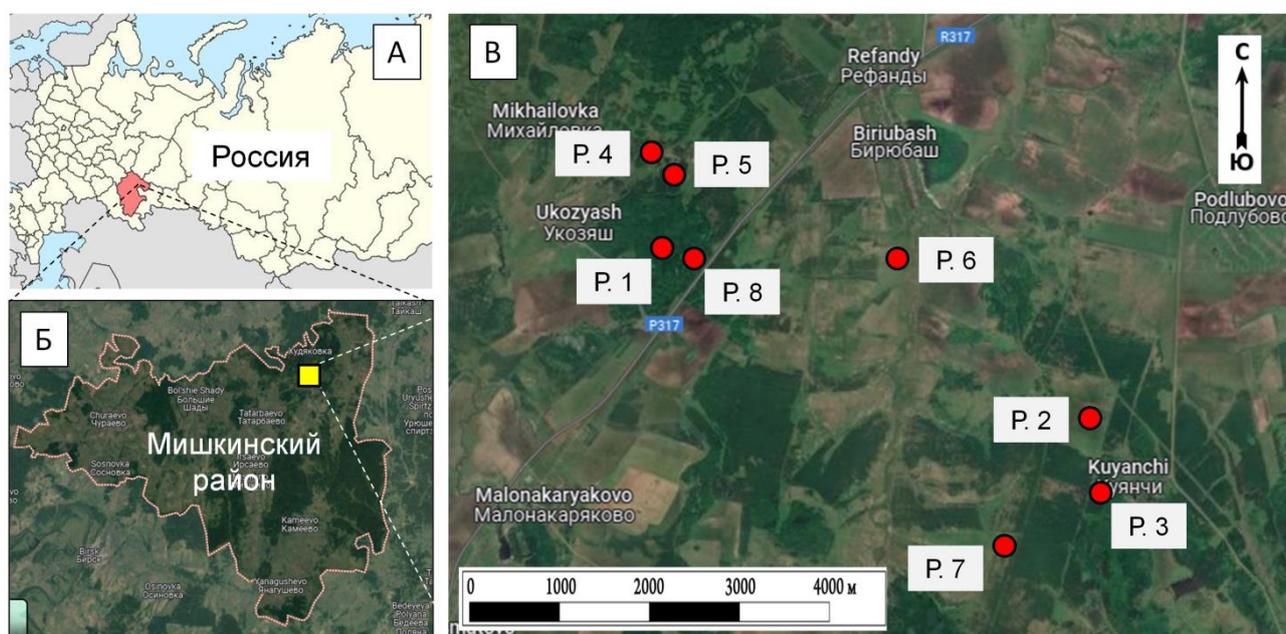


Рисунок. Месторасположение карбонового полигона «Мишкино» в пределах: А – России, Б – Мишкинского района Республики Башкортостан. В – схема заложения разрезов на карбоновом полигоне «Мишкино»: P.1 – березняк (у деревни Укозяш), P.2 и P.4 – сенокос суходольный, P.3 – березняк (у деревни Куянчи), P.5 и P.8 – сенокос влажный, P.6 – пастбище сильносбитое, P.7 – залежь травяная.

Места заложения разрезов, почвенных прикопок и точек бурения в лесу и на залежи возрастом 20–25 лет, используемой в качестве сенокосов и пастбищ, выбраны в соответствии с геоботаническим обследованием. Всего было заложено восемь разрезов, 140 прикопок и 43 точки бурения. Отбор почвенных проб проводили из базовых разрезов и прикопок из слоев 0–10, 10–20, 20–30, 30–40 и 40–50 см. Также в пределах 10–20 м от основной точки исследования отбирали пробы почвенным буром из слоёв 0–30 и 30–60 см в пятикратной повторности. Для расчетов запасов органического вещества из базовых разрезов и прикопок отбирали образцы ненарушенной почвы на определение ее объёмной массы. Для этого послойно через каждые 10 см забивали металлические гильзы (высотой 10 см и диаметром 5 или 10 см). Определение содержания органического вещества почвы проводили согласно (ГОСТ 26213-2021), рН водной и солевой вытяжек – потенциметрически, азот щелочногидролизующий ($N_{щел}$) – по Корнфилду (Агрехимические ..., 1975), фосфор подвижный и калий обменный – по Чирикову (ГОСТ 26204-91).

Запасы $C_{орг}$ в почве определяли по формуле (Вадюнина, Корчагина, 1986):

$$3C_{орг} = C \times V \times \Pi,$$

где $3C_{орг}$ – запасы $C_{орг}$, т/га; C – содержание $C_{орг}$, %; V – мощность слоя, см; Π – объёмная масса, г/см³.

Результаты обрабатывали статистически с помощью пакета программ Excel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Территория участка «Мишкино» по ботанико-географическому районированию относится к зоне широколиственных лесов (Атлас ..., 2005), а в соответствии с морфологической и агропроизводственной характеристикой почв – к агропочвенному округу увалистого междуречья Уфа – Белая Северной лесостепной зоны Республики Башкортостан (Почвы Башкортостан, 1995). Почвенный покров представлен наиболее распространенным в этой зоне типом серых лесных почв, подтипами собственно серыми и тёмно-серыми лесными почвами (Albic Greyic Phaeozems – согласно международной классификации IUSS Working Group WRB (2015)).

Для характеристики морфологических свойств приводится описание типичных разрезов.

Разрез 1. A_1 0–32 см – серый, сухой, непрочнo-комковатый, среднесуглинистый, слабоуплотнённый, переход заметный по цвету; A_2B 32–52 см – серовато-буроватый, влажноватый, ореховатый, по граням кремнеземистый налёт, среднесуглинистый, уплотнённый, редкие корни деревьев, переход заметный по цвету; B 52–... – бурый, влажный, крупно-ореховатый, тяжелосуглинистый, ближе к лёгкой глине, уплотнённый, единичные корни. Почва: серая лесная среднесуглинистая среднeмощная.

Разрез 5. A_1 0–42 см – тёмно-серый, влажноватый, мелкозернисто-комковатый, среднесуглинистый, рыхлый, включения корней, переход ясный; AB 42–57 см – буровато-серый, влажный, ореховатый, тяжелосуглинистый, слабоуплотнённый, редкие корни трав, переход постепенный; B 57–... – бурый, влажноватый, ореховато-призматический, тяжелосуглинистый, уплотнённый. Почва: тёмно-серая лесная среднесуглинистая среднeмощная.

Почвы участка «Мишкино» среднeмощные; по структуре гумусово-аккумулятивных горизонтов серые лесные в основном непрочнo-комковатые; а тёмно-серые – мелкозернисто-комковатые; по гранулометрическому составу средне- и тяжелосуглинистые; под лесом рыхлые, под травянистой растительностью слабоуплотнённые. Почвообразующими породами для этих почв служат делювиальные отложения тяжелого гранулометрического состава.

Агрехимическая характеристика почв представлена в таблице 1. Серые лесные и тёмно-серые лесные почвы, как под лесом, так и на залежи, по степени гумусированности относятся к категории «высокая», тогда как в пахотных почвах – к «средней» категории. С глубиной в серых лесных почвах содержание гумуса снижается резко, в тёмно-серых – постепенно. Оба подтипа характеризуются средне- или сильнокислой реакцией среды, мало изменяющейся вниз по профилю почвы. Обеспеченность серой лесной почвы щелочногидролизующим азотом «повышенная», а тёмно-серой – «высокая»; подвижным фосфором – «очень низкая» и «низкая» независимо от подтипа, только в почве бывшей пашни под травяной залежью «средняя»; обменным калием – «средняя» и «повышенная». Эти почвы характеризуются достаточной обеспеченностью питательными элементами (кроме фосфора) и в целом благоприятны для роста и развития растений.

Таблица 1

Агрохимическая характеристика почв

№ раз-реза	Тип растительного сообщества	Почва	Слой, см	pH _{вод}	pH _{сол}	N _{щел}	P ₂ O ₅ подв.	K ₂ O обм.
							мг/кг	
Р.3	Березняк (у деревни Куянчи)	Тёмно-серая лесная	0–10	5,1	4,2	338	19	80
			10–20	5,3	4,2	281	24	75
			20–30	5,1	4,1	–	15	70
			30–40	5,1	4,1	–	17	65
			40–50	5,0	3,8	–	23	90
Р.1	Березняк (у деревни Укозяш)	Серая лесная	0–10	5,1	3,9	112	36	95
			10–20	4,9	3,7	96	29	60
			20–30	5,0	3,8	–	17	50
			30–40	5,0	3,9	–	23	55
			40–50	4,9	3,9	–	18	85
Р.2	Сенокос суходольный	Тёмно-серая лесная	0–10	5,4	4,4	309	15	40
			10–20	5,4	4,4	278	16	40
			20–30	5,3	4,3	–	14	45
			30–40	5,3	4,3	–	18	55
			40–50	5,1	4,2	–	17	65
Р.4	Сенокос суходольный	Тёмно-серая лесная	0–10	5,5	4,5	246	41	90
			10–20	5,6	4,7	231	36	55
			20–30	5,6	4,6	–	31	60
			30–40	5,7	4,7	–	38	65
			40–50	5,5	4,6	–	63	75
Р.5	Сенокос влажный	Тёмно-серая лесная	0–10	5,3	4,4	325	18	75
			10–20	4,9	4,3	195	11	60
			20–30	5,3	4,4	–	9	40
			30–40	5,2	4,2	–	11	45
			40–50	5,4	4,3	–	12	55
Р.8	Сенокос влажный	Тёмно-серая лесная	0–10	5,2	4,2	277	18	85
			10–20	5,1	4,1	192	17	60
			20–30	5,3	4,2	–	20	55
			30–40	5,2	4,2	–	23	45
			40–50	5,3	4,3	–	19	75
Р.6	Пастбище сильносбитое	Тёмно-серая лесная	0–10	5,3	4,4	318	14	50
			10–20	5,6	4,6	210	12	45
			20–30	5,5	4,5	–	17	25
			30–40	5,2	4,4	–	10	55
			40–50	5,2	4,3	–	12	55
Р.7	Залежь травяная	Серая лесная	0–10	5,8	4,9	217	94	85
			10–20	5,6	4,6	205	46	85
			20–30	5,5	4,5	–	40	75
			30–40	5,4	4,5	–	28	70
			40–50	5,4	4,4	–	19	90

Примечание.

Прочерк означает, что щелочногидролизуемый азот не определяли.

Содержание органического углерода в гумусово-аккумулятивных горизонтах почв при их переводе в залежь изменяется в зависимости от множества факторов: типа почвы, расположения в ландшафте, интенсивности и характера предыдущего использования и др. Как правило, залежный режим способствует накоплению органического вещества, обусловленному, прежде всего,

увеличением поступающего в почву растительного материала и отсутствием механической обработки почв. Вместе с тем, при определенных условиях может происходить снижение содержания $C_{орг}$ (Люри и др., 2013; Соболев и др., 2015; Когут и др., 2021). По сравнению с бывшими пахотными почвами, недавно выведенными из сельскохозяйственного оборота, содержание органического углерода в серой лесной почве на участке «Мишкино» на 33% выше в залежных почвах (Fedorov et al., 2023). При этом под лесом и на травяной залежи оно практически одинаковое как в слое 0–30, так и в слое 30–60 см (табл. 2). В аналогичных почвах, но в другом регионе (лесостепная зона Красноярского края), содержание гумуса в верхнем 0–10 см слое почвы выше под лесом, чем под травянистой растительностью (Токавчук, Сорокина, 2009), а серые почвы залежи, используемой как сенокос, занимали среднее положение по показателям плодородия, в том числе и содержанию $C_{орг}$, между пашней и чистой залежью Ачинско-Боготольской лесостепи (Сорокина, 2018).

Таблица 2

Содержание и запасы органического углерода в серых и тёмно-серых лесных почвах

Тип сообщества	Почва	$C_{орг}$, %		Запасы $C_{орг}$, т/га		
		0–30 см	30–60 см	0–30 см	30–60 см	0–60 см
Березняк (у д. Куянчи)	Тёмно-серая лесная	8,8±0,1 ^a (n=49)	6,4±0,5 ^a (n=7)	257±3 ^a (n=49)	235±18 ^a (n=7)	492
Березняк (у д. Укозяш)	Серая лесная	3,2±0,2 ^c (n=28)	1,9±0,3 ^c (n=10)	94±5 ^d (n=28)	68±10 ^c (n=28)	162
Сенокос суходольный	Тёмно-серая лесная	5,4±0,2 ^b (n=30)	3,9±0,4 ^b (n=10)	179±6 ^{bc} (n=30)	152±18 ^b (n=10)	331
Сенокос влажный	Тёмно-серая лесная	5,7±0,4 ^b (n=27)	4,3±0,2 ^b (n=9)	187±7 ^b (n=27)	156±15 ^b (n=9)	343
Пастбище сильносбитое	Тёмно-серая лесная	5,1±0,2 ^b (n=31)	3,9±0,2 ^b (n=10)	167±6 ^c (n=31)	152±8 ^b (n=10)	319
Залежь травяная	Серая лесная	3,2±0,1 ^c (n=29)	1,9±0,3 ^c (n=9)	102±3 ^d (n=29)	77±11 ^c (n=9)	179

Примечание.

Валовое содержание и запасы органического углерода представлены в виде среднего арифметического значения и стандартной ошибки. В скобках указано количество определений. Буквенными индексами обозначена достоверность различий (двухвыборочный t-тест, $p < 0,05$): одинаковые индексы означают отсутствие различий, разные индексы – различия достоверны.

Необходимо отметить, что для определения баланса углерода в экосистемах такой показатель как запасы $C_{орг}$ является более информативным, чем его содержание (Столбовой, 2020). Это связано с тем, что снижение содержания почвенного органического вещества приводит к уплотнению почвы, а следовательно, к увеличению ее объёмной массы; поэтому процентное уменьшение содержания углерода оказывается больше реального, компенсируясь уменьшением объёма почвенной массы. В глобальном масштабе для определения актуальных запасов органического углерода и потенциала почв для дальнейшей секвестрации CO_2 с участием более 100 государств была составлена Всемирная карта запасов органического углерода в слое 0–30 см почв (проект ФАО ООН GSOC17).

На участке «Мишкино» запасы $C_{орг}$ в слое 0–30 см на травяной залежи оказались несколько выше, чем в почве березняка, вследствие более высокой плотности сложения почвы. В слое 30–60 см запасы $C_{орг}$ в почве травяной залежи и березняка оказались практически равными, поскольку различия, имеющиеся в верхней части почвенного профиля, на глубине в почвах одного подтипа не проявляются. Незначительность различий, помимо всего прочего, может также зависеть от временного фактора: для повышения содержания органического углерода в почве требуется гораздо больше времени, чем для снижения. Иногда для этого требуется порядка сотни лет (Stockmann et al., 2013).

В тёмно-серых лесных почвах сенокосов и пастбищ участка «Мишкино» содержание и запасы органического углерода в верхнем 30-см слое были намного выше, чем в серых лесных почвах, что обусловлено прежде всего генезисом этих почв. Запасы $C_{орг}$ в почвах под травянистой растительностью оказались близки между собой, но при этом выражена тенденция к их возрастанию в ряду: пастбище сильносбитое – сенокос суходольный – сенокос влажный. В тоже время, в тёмно-серой лесной почве под березняком, где отсутствует отчуждение биомассы растений, содержание $C_{орг}$ на 50–70% выше, чем в аналогичных почвах сенокосов и пастбищ. Такое же соотношение характерно

и для тёмно-серых лесных почв Курской области, где содержание углерода в почве под лесом в полтора раза выше, чем на залежи, и в два раза – чем на пашне (Недбаев, Малышева, 2018; Недбаев, 2022).

Промежуточное по содержанию и запасам органического углерода положение, занимаемое почвами залежей между целиной (лесом) и пашней обусловлено, прежде всего, быстрыми потерями органического вещества при распашке почв и сравнительно медленным процессом гумусонакопления. С течением времени почвы залежей, в том числе сенокосов и пастбищ, теоретически могут приближаться к целинным аналогам. В тоже время необходимо отметить, что в среднем даже за длительный срок такие почвы могут не накапливать, а терять органический углерод. Так, в работе (Барсуков, Ызаканов, 2022) показано, что в течение XX века почвы сенокосов и пастбищ лесостепной зоны Западной Сибири теряли углерод, хотя и в 5–7 раз меньше, чем пахотные. Кроме того, необходимо учитывать и смену сельскохозяйственного использования (цикл пашня-залежь), которая может неоднократно происходить за длительный период и приводить к снижению запасов углерода в почве (Чернова и др., 2016).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Почвы северной лесостепи Южного Предуралья отличаются высоким содержанием органического углерода, что обусловлено гумификацией достаточно большого количества лесного опада и растительных остатков в условиях континентального климата и близкого залегания известковых почвообразующих пород, состав и свойства которых способствуют нейтрализации кислых продуктов разложения и закреплению органического вещества в почве. В основном эти процессы происходят в гумусово-аккумулятивных горизонтах укороченного почвенного профиля, характерного для региона.

В серой лесной почве содержание $C_{орг}$ под лесом и на травяной залежи, используемой в качестве сенокосов и пастбищ, существенно не различается и составляет 3,2%, а его запасы – 94–102 т/га. По этим показателям серые лесные почвы под травянистыми растительными сообществами в 1,6–1,9 раза уступают подтипу тёмно-серой лесной. В этой почве запасы $C_{орг}$ под травянистой растительностью постепенно возрастают в ряду: пастбище сильносбитое – сенокос суходольный – сенокос влажный. В тоже время, в тёмно-серой лесной почве под березняком содержание и запасы $C_{орг}$ на 50–70% выше, чем на сенокосах и пастбищах. Перевод пахотных почв лесостепи Южного Предуралья в залежь способствовал снижению чрезмерной распаханности территории, прекращению низкорентабельного сельскохозяйственного производства, проявлению тенденции к восстановлению почв до целинных аналогов и снижению эрозионной опасности. Промежуточное по содержанию и запасам органического углерода состояние, занимаемое почвой залежи между пашней и лесом, дает основание предполагать, что со временем в почвах сенокосов и пастбищ эти показатели могут значительно увеличиться.

В целом занятые травянистой растительностью почвы участка карбонового полигона «Мишкино», особенно тёмно-серые лесные, обладают высоким потенциалом к депонированию углерода.

ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Оценка баланса парниковых газов на участках Евразийского карбонового полигона с целью разработки технологий увеличения депонирования углерода экосистемами Республики Башкортостан на 2024–2026 годы» (№ для публикаций: FEUR-2024-0007).

ЛИТЕРАТУРА

Абакумов Е.В., Поляков В.И., Чуков С.Н. Подходы и методы изучения органического вещества почв карбоновых полигонов России (обзор) // Почвоведение. 2022. № 7. С. 773–786. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22070024>

Агрохимические методы исследования почв / А.В. Соколов (отв. ред.). Москва: Наука, 1975. 656 с.

Атлас Республики Башкортостан / И.М. Япаров (отв. ред.). Уфа: Китап, 2005. 420 с.

Баева Ю.И., Курганова И.Н., Лопес Де Гереню В.О., Овсепян Л.А., Телеснина В.М., Цветкова Ю.Д. Изменение агрегатного состава различных типов почв в ходе залежной сукцессии // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2017. Выпуск 88. С. 47–74. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-88-47-74>

- Барсуков П.А., Ызаканов Т.Ж. Расчет потерь органического углерода из почв на примере лесостепи Западной Сибири // Известия ВУЗов Кыргызстана. 2022. № 6. С. 123–130. <https://doi.org/10.26104/IVK.2022.45.557#>
- Вадюнина А.Ф., Корчагина З.А. Методы исследования физических свойств почв. Москва: Агропромиздат, 1986. 416 с.
- ГОСТ 26204–91. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Чирикова в модификации ЦИНАО. Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 8 с.
- ГОСТ 26213–2021. Почвы. Методы определения органического вещества. Москва: Российский институт стандартизации, 2021. 8 с.
- ГОСТ Р 58595–2019. Почвы. Отбор проб. Официальное издание. Москва: Стандартинформ, 2019. 6 с.
- Доклад о состоянии и использовании земель в Республике Башкортостан (2020 год). Ч. 2. Уфа, 2021. 230 с.
- Когут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н. Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода // Агрохимия. 2021. № 5. С. 3–13. <https://doi.org/10.31857/S0002188121050070>
- Кудряков В.Н. Почвенно-биогеохимические аспекты состояния земледелия в Российской Федерации // Почвоведение. 2019. № 1. С. 109–121. <https://doi.org/10.1134/S0032180X1901009X>
- 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 состояния почв и запасы углерода в лесной растительности // Почвы и окружающая среда. 2022. Том 5. № 2. e169. <https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.169>
- 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. Москва: ГЕОС, 2010. 416 с.
- Люри Д.И., Карелин Д.В., Кудиков А.В., Горячкин С.В. Изменение почвенного дыхания в ходе постагрогенной сукцессии на песчаных почвах в южной тайге // Почвоведение. 2013. № 9. С. 1060–1072. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13070058>
- Миллер Г.Ф., Соловьев С.В., Безбородова А.Н. Почвенно-экологическая оценка разновозрастных залежей юго-востока Западной Сибири // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 4. e230. <https://doi.org/10.31251/pos.v6i4.230>
- Недбаев В.Н. Экологические и биогеохимические особенности окультуривания темно-серой лесной почвы Центрального Черноземья // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 3. С. 14–22.
- Недбаев В.Н., Малышева Е.В. Содержание гумуса в темно-серых лесных почвах и его трансформация в агроландшафтах Центрально-Черноземной зоны // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 8. С. 65–70.
- Нечаева Т.В. Залежные земли России: распространение, агроэкологическое состояние и перспективы использования (обзор) // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 2. e215. <https://doi.org/10.31251/pos.v6i2.215>
- Почвы Башкортостана / Ф.Х. Хазиев (отв. ред.). Уфа: Гилем, 1995. 384 с.
- Рыжова И.М., Ерохова А.А., Подвезенная М.А. Динамика и структура запасов углерода в постагрогенных экосистемах южной тайги // Почвоведение. 2014. № 12. С. 1426–1435. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14090111>
- Соболь Н.В., Габбасова И.М., Комиссаров М.А., Сулейманов Р.Р. Эродированные почвы Зауральской степной зоны и оценка их состояния в условиях изменения климата // Известия Уфимского научного центра РАН. 2015. № 4–1. С. 143–146.
- Сорокина О.А. Оценка запасов фитомассы и плодородия серых почв залежей // Почвы и окружающая среда. 2018. Том 1. № 3. С. 170–179. <https://doi.org/10.31251/pos.v1i3.40>
- Столбовой В.С. Регенеративное земледелие и смягчение изменений климата // Достижения науки и техники АПК. 2020. Том 34. № 7. С. 19–26. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10703>
- Токавчук В.В., Сорокина О.А. Оценка влияния леса на агрохимические свойства почв залежей лесостепной зоны // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2009. № 6. С. 9–17.
- Федоров Ю.А., Сухоруков В.В., Трубник Р.Г. Аналитический обзор: эмиссия и поглощение парниковых газов почвами. Экологические проблемы // Антропогенная трансформация природной среды. 2021. Том 7. № 1. С. 6–34. <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-6-34>

- Чернова О.В., Рыжова И.М., Подвезенная М.А. Опыт региональной оценки изменений запасов углерода в почвах южной тайги и лесостепи за исторический период // Почвоведение. 2016. № 8. С. 1013–1028. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16080037>
- Batjes N.H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world // European Journal of Soil Science. 1996. Vol. 47. No. 2. P. 151–163. https://doi.org/10.1111/ejss.12114_2
- Dalal R.C., Allen D.E. Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems // Australian Journal of Botany. 2008. Vol. 56. No. 5. P. 369–407. <https://doi.org/10.1071/BT07128>
- Fedorov N., Shirokikh P., Zhigunova S., Baisheva E., Tuktamyshev I., Bikbaev I., Komissarov, M., Zaitsev G., Giniyatullin R., Gabbasova I., Urazgildin R., Kulagin A., Suleymanov R., Gabbasova D., Muldashev A., Maksyutov S. Dynamics of biomass and carbon stocks during reforestation on abandoned agricultural lands in Southern Ural region // Agriculture. 2023. Vol. 13. No. 7. 1427. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071427>
- Guo L.B., Gifford R.M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis // Global Change Biology. 2002. Vol. 8. No. 4. P. 345–360. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. 2015. FAO, Rome. 182 p.
- Kalinina O., Krause S.-E., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Giani L. Self-restoration of postagrogenic chernozems of Russia: soil development, carbon stocks, and dynamics of carbon pools // Geoderma. 2011. Vol. 162. No. 1–2. P. 196–206. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.02.005>
- Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Six J., Kuzyakov Y. Carbon cost of collective farming collapse in Russia // Global Change Biology. 2014. Vol. 20. No. 4. P. 938–947. <https://doi.org/10.1111/gcb.12379>
- Lal R. Carbon sequestration // Philosophical Transactions of the Royal Society. 2008. Vol. 363. P. 815–830.
- Milne E., Al-Adamat R., Batjes N., Bernoux M., Bhattacharyya T., Cerri C.C., Cerri C.E.P., Coleman K., Easter M.J., Falloon P., Feller C., Gicheru P., Kamoni P., Killian K., Pal D.K., Paustian K., Powlson D.S., Rawajfeh Z., Sessay M., William S., Wokabi S.M. National and sub national assessments of soil organic carbon stocks and changes: the GEFSOC modelling system // Agriculture, Ecosystems & Environment. 2007. Vol. 122. No. 1. P. 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.01.002>
- Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z.-S., Cheng K., Das B.S., Field D.J., Gimona A., Hedley C.B., Hong S.Y., Mandal B., Marchant B.P., Martin M., McConkey B.G., Mulder V.L., O'Rourke Sh., Richer-de-Forges A.C., Odeh I., Padarian J., Paustian K., Pan G., Poggio L., Savin I., Stolbovoy V., Stockmann U., Sulaeman Yi., Tsui C.-C., Vågen T.-G., Wesemael B.V., Winowiecki L. Soil carbon 4 per mille // Geoderma. 2017. Vol. 292. P. 59–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- Oelkers E.H., Cole D.R. Carbon dioxide sequestration: a solution to the global problem // Elements. 2008. Vol. 4. No. 5. P. 305–310. <https://doi.org/10.2113/gselements.4.5.305>
- Smith P. Land use change and soil organic carbon dynamics // Nutrient Cycling in Agroecosystems. 2008. Vol. 81. P. 169–178. <https://doi.org/10.1007/s10705-007-9138-y>
- Shukla P.R., Skea J., Slade R., Al Khouradajie A., Van Diemen R., McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M. Climate change 2022: Mitigation of climate change // Contribution of working group III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2022. Vol. 10. P. 9781009157926. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>
- Stockmann U., Adams M.A., Crawford J.W., Field D.J., Henakaarchchi N., Jenkins M., Minasny B., McBratney A.B., de Remy de Courcelles V., Singh K., Wheeler I., Abbott L., Angers D.A., Baldock J., Bird M., Brookes P.C., Chenu C., Jastrow J.D., Lal R., Lehmann J., O'Donnell A.G., Parton W.J., Whitehead D., Zimmermann M. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon // Agriculture, Ecosystems & Environment. 2013. Vol. 164. P. 80–99. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001>

Поступила в редакцию 27.07.2024

Принята 08.08.2024

Опубликована 05.09.2024

Сведения об авторах:

Комиссаров Михаил Александрович – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории почвоведения Уфимского Института биологии – обособленного структурного подразделения ФГБНУ Уфимский федеральный исследовательский центр РАН (г. Уфа, Россия); старший научный сотрудник лаборатории мониторинга климатических изменений и углеродного

баланса экосистем Уфимского государственного нефтяного технического университета (г. Уфа, Россия); mkomissarov@list.ru

Айвазян Михаил Михайлович – аспирант лаборатории почвоведения Уфимского Института биологии – обособленного структурного подразделения ФГБНУ Уфимский федеральный исследовательский центр РАН (г. Уфа, Россия); лаборант лаборатории мониторинга климатических изменений и углеродного баланса экосистем Уфимского государственного нефтяного технического университета (г. Уфа, Россия); fencer90@mail.ru

Габбасова Илюся Масгутовна – доктор биологических наук, профессор, заведующая лабораторией почвоведения Уфимского Института биологии – обособленного структурного подразделения ФГБНУ Уфимский федеральный исследовательский центр РАН (г. Уфа, Россия); главный научный сотрудник лаборатории мониторинга климатических изменений и углеродного баланса экосистем Уфимского государственного нефтяного технического университета (г. Уфа, Россия); gimib@mail.ru

Гарипов Тимур Талмасович – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории почвоведения Уфимского Института биологии – обособленного структурного подразделения ФГБНУ Уфимский федеральный исследовательский центр РАН (г. Уфа, Россия); старший научный сотрудник лаборатории мониторинга климатических изменений и углеродного баланса экосистем Уфимского государственного нефтяного технического университета (г. Уфа, Россия); timurgar@gmail.com

Сулейманов Руслан Римович – доктор биологических наук, главный научный сотрудник лаборатории почвоведения Уфимского Института биологии – обособленного структурного подразделения ФГБНУ Уфимский федеральный исследовательский центр РАН (г. Уфа, Россия); начальник лаборатории искусственного интеллекта в исследованиях окружающей среды Уфимского государственного нефтяного технического университета (г. Уфа, Россия); soils@mail.ru

Федоров Николай Иванович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией геоботаники и растительных ресурсов Уфимского Института биологии – обособленного структурного подразделения ФГБНУ Уфимский федеральный исследовательский центр РАН (г. Уфа, Россия); главный научный сотрудник лаборатории мониторинга климатических изменений и углеродного баланса экосистем Уфимского государственного нефтяного технического университета (г. Уфа, Россия); fedorov@anrb.ru

Рухович Дмитрий Иосифович – кандидат биологических наук, заведующий лабораторией почвенной информатики ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Почвенный институт им. В.В. Докучаева» (г. Москва, Россия); landmap@yandex.ru

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

Soil organic carbon content and stock in the abandoned lands in the forest-steppe of the Southern Cis-Urals

© 2024 M. A. Komissarov ^{1,2}, M. M. Ayvazyan ^{1,2}, I. M. Gabbasova ^{1,2}, T. T. Garipov ^{1,2},
R. R. Suleymanov ^{1,2}, N. I. Fedorov ^{1,2}, D. I. Rukhovich ³

¹Ufa Institute of Biology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, prospekt Oktyabrya, 69, Ufa, 450054, Russia. E-mail: mkomissarov@list.ru

²Ufa State Petroleum Technical University, st. Kosmonavtov, 1, Ufa, 450064, Russia

³V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Pyzhevskiy Pereulok, 7, buil. 2, Moscow, 119017, Russia

Purpose of the study was to analyze soil organic carbon (SOC) content and stocks in the abandoned lands of the Southern Cis-Ural, which are used as hayfields and pastures or are under spontaneous forest revegetation.

Location and time of the study. Russian Federation, Republic of Bashkortostan, Mishkinsky district, «Eurasian carbon polygon», May-October 2023.

Methods. Soil samples were taken layer by layer (every 10 cm to a depth of 60 cm) from the abandoned (for 20–25 yrs) lands of the carbon polygon occupied by birch forests, hayfields and pastures. The samples were used to determine the content of organic carbon, alkali-hydrolyzable nitrogen, mobile phosphorus and exchangeable potassium, as well as pH (water) and salts.

Main results. The SOC content both under forest and grasslands in the 0–30 cm layer in gray forest soil was 3.2%, (in the 30–60 cm layer – 1.9%); SOC stock was estimated as 94–102 t/ha (in a layer of 0–60 cm – 162–179 t/ha). The SOM content in the dark-gray forest soil under a birch forest was 8.8% in the 0–30 cm layer (6.4% in the 30–60 cm layer), and its stocks were 257 t/ha (492 t/ha in the 0–60 cm layer). The SOC content in the 0–30 cm layer of grasslands used as hayfields and pastures was 5.1–5.7% in the 0–30 cm layer and 3.9–4.3% in the 30–60 cm layer. The respective SOC stock was estimated as 167–187 t/ha in the 0–30 cm layer and 319–343 t/ha in the 0–60 cm layer.

Conclusion. The SOC content and stock in the gray forest soil under communities of herbs and grasses were 1.6–1.9 times less than in the dark-gray birch forest soil, where the content and SOC stock were 50–70% higher than in hayfields and pastures. Thus abandonment of the arable lands in the forest-steppe in the southern Cis-Urals region decreased the excessive percentage of ploughed land, stopped the low-profitable agricultural production and started spontaneous restoration of ecosystems and their soils in the direction of adjacent virgin ones, decreasing erosion hazards. The SOC and its stock values of the abandoned soils being between the respective ones for the arable and virgin soil, suggest that further on with course of time these properties may significantly increase.

Keywords: abandoned land; soil organic carbon; birch forest; pasture; hayfield; gray forest soils (Albic Greyic Phaeozems).

How to cite: Komissarov M.A., Ayvazyan M.M., Gabbasova I.M., Garipov T.T., Suleymanov R.R., Fedorov N.I., Rukhovich D.I. Soil organic carbon content and stock in the abandoned lands in the forest-steppe of the Southern Cis-Urals. *The Journal of Soils and Environment*. 2024. 7(3). e271. DOI: [10.31251/pos.v7i3.271](https://doi.org/10.31251/pos.v7i3.271) (in Russian with English abstract).

FUNDING

This research was performed within the state assignment framework of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation «Assessment of greenhouse gas balance in the Eurasian carbon polygon with the aim to develop technologies to increase carbon stocks by ecosystems of the Republic of Bashkortostan for 2024–2026» (Number for publications: FEUR-2024-0007).

REFERENCES

- Abakumov E.V., Polyakov V.I., Chukov S.N. Approaches and methods for studying soil organic matter in the carbon polygons of Russia (review). *Eurasian Soil Science*. 2022. Vol. 55. No. 7. P. 849–860. <https://doi.org/10.1134/s106422932207002x>
- Agrochemical methods for soil research / A.V. Sokolov (ed.). Moscow: Nauka Publ., 1975. 656 p. (in Russian).
- Atlas of the Republic of Bashkortostan / I.M. Yaparov (ed.). Ufa: Kitap Publ., 2005. 420 p. (in Russian).
- Baeva Yu.I., Kurganova I.N., Lopes De Gerenyu V.O., Ovsepyan L.A., Telesnina V.M., Tsvetkova Yu.D. Change in aggregate structure of various soil types during the succession of abandoned lands. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2017. Vol. 88. P. 47–74. (in Russian). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-88-47-74>
- Barsukov P.A., Yzakanov T.Zh. Calculation of organic carbon losses from soils on the example of the forest-steppe of western Siberia. *Izvestiya VUZov Kyrgyzstana*. No. 6. 2022. P. 123–130. (in Russian). <https://doi.org/10.26104/IVK.2022.45.557#>
- Vadyunina A.F., Korchagina Z.A. Methods for studying the physical properties of soils. Moscow: Agropromizdat, 1986. 416 p. (in Russian).
- GOST 26204–91. Soils. Determination of mobile compounds of phosphorus and potassium using the Chirikov method as modified by TsINAO. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2021. 8 p. (in Russian).
- GOST 26213–2021. Soils. Methods for determining organic matter. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2021. 8 p. (in Russian).
- GOST R 58595–2019. Soils. Sample selection. Official publication. Moscow: Standardinform, 2019. 6 p. (in Russian).
- Report on the state and use of land in the Republic of Bashkortostan (2020). Part 2. Ufa, 2021. 230 p. (in Russian).
- Kogut B.M., Semenov V.M., Artemyeva Z.S., Danchenko N.N. Dehumidification and soil sequestration of carbon. *Agrokhimia*. 2021. No. 5. P. 3–13. (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0002188121050070>
- Kudeyarov V.N. Soil-biogeochemical aspects of arable farming in the Russian Federation. *Eurasian Soil Science*. 2019. Vol. 52. No. 1. P. 94–104. <https://doi.org/10.1134/S1064229319010095>

- Kurganova I.N., Lopez 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. Vol. 5. No. 2. e169. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.169>
- Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A., Nefedova T.G. Dynamics of agricultural lands in Russia in the 20th century and post-agrogenic restoration of vegetation and soils. Moscow: GEOS Publ., 2010. 416 p. (in Russian).
- Lyuri D.I., Karelin D.V., Kudikov A.V., Goryachkin S.V. Changes in soil respiration in the course of the postagrogenic succession on sandy soils in the Southern taiga zone. *Eurasian Soil Science*. 2013. Vol. 46. No. 9. P. 935–947. <https://doi.org/10.1134/S1064229313070041>
- Miller G.F., Solovyov S.V., Bezborodova A.N. Soil-ecological assessment of soils of abandoned lands of different age in the southeast of West Siberia. *The Journal of Soils and Environment*. 2023. Vol. 6. No. 4. e230. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v6i4.230>
- Nedbaev V.N. Ecological and biogeochemical features of cultivation of dark gray forest soil of the Central Black Earth region. *Vestnik Kurskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii*. 2022. No. 3. P. 14–22. (in Russian).
- Nedbaev V.N., Malysheva E.V. The humus content in dark gray forest soils and its transformation in agricultural the agricultural landscapes of the Central Black Earth zone. *Vestnik Kurskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii*. 2018. No. 8. P. 65–70. (in Russian).
- Nechaeva T.V. Abandoned lands in Russia: distribution, agroecological status and perspective use (a review). *The Journal of Soils and Environment*. 2023. Vol. 6. No. 2. e215. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v6i2.215>
- Soils of Bashkortostan / F.Kh. Khaziev (ed.). Ufa: Gilem Publ., 1995. 384 p. (in Russian).
- Ryzhova I.M., Erokhova A.A., Podvezennaya M.A. Dynamics and structure of carbon storage in the postagrogenic ecosystems of the southern taiga. *Eurasian Soil Science*. 2014. Vol. 47. No. 12. P. 1207–1215. <https://doi.org/10.1134/S1064229314090117>
- Sobol N.V., Gabbasova I.M., Komissarov M.A., Suleymanov R.R. Eroded soils of the Trans-Ural steppe zone and assessment of their condition in conditions of climate change. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2015. No. 4-1. P. 143–146. (in Russian).
- Sorokina O.A. Estimation of phytomass reserves and fertility of gray soil assets. *The Journal of Soils and Environment*. 2018. Vol. 1 No. 3. P. 170–179. (in Russian). <https://doi.org/10.31251/pos.v1i3.40>
- Stolbovoy V.S. Regenerative agriculture and climate change mitigation. *Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex*. 2020. Vol. 34. No. 7. P. 19–26. (in Russian). <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10703>
- Tokavchuk V.V., Sorokina O.A. Assessment of the influence of forests on the agrochemical properties of fallow soils in the forest-steppe zone. *Bulletin of Krasnoyarsk Agrarian University*. 2009. No. 6. P. 9–17. (in Russian).
- Fedorov Yu.A., Sukhorukov V.V., Trubnik R.G. Review: emission and absorption of greenhouse gases by soils. *Ecological problems. Anthropogenic Transformation of Environment*. 2021. Vol. 7. No. 1. P. 6–34. (in Russian). <https://doi.org/10.17072/2410-8553-2021-1-6-34>
- Chernova O.V., Ryzhova I.M., Podvezennaya M.A. An experience in regional estimates of changes in soil carbon pools of the southern taiga and forest-steppe during the historical period. *Eurasian Soil Science*. 2016. Vol. 49. No. 8. P. 954–967. <https://doi.org/10.1134/S1064229316080032>
- Batjes N.H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. *European Journal of Soil Science*. 1996. Vol. 47. No. 2. P. 151–163. https://doi.org/10.1111/ejss.12114_2
- Dalal R.C., Allen D.E. Greenhouse gas fluxes from natural ecosystems. *Australian Journal of Botany*. 2008. Vol. 56. No. 5. P. 369–407. <https://doi.org/10.1071/BT07128>
- Fedorov N., Shirokikh P., Zhigunova S., Baisheva E., Tuktamyshev I., Bikbaev I., Komissarov, M., Zaitsev G., Giniyatullin R., Gabbasova I., Urazgildin R., Kulagin A., Suleymanov R., Gabbasova D., Muldashev A., Maksyutov S. Dynamics of biomass and carbon stocks during reforestation on abandoned agricultural lands in Southern Ural region. *Agriculture*. 2023. Vol. 13. No. 7. 1427. <https://doi.org/10.3390/agriculture13071427>
- Guo L.B., Gifford R.M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*. 2002. Vol. 8. No. 4. P. 345–360.
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. 2015. FAO, Rome. 182 p.

- Kalinina O., Krause S.-E., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Lyuri D.I., Giani L. Self-restoration of postagrogenic chernozems of Russia: soil development, carbon stocks, and dynamics of carbon pools. *Geoderma*. 2011. Vol. 162. No. 1–2. P. 196–206. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.02.005>
- Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Six J., Kuzzyakov Y. Carbon cost of collective farming collapse in Russia. *Global Change Biology*. 2014. Vol. 20. No. 4. P. 938–947. <https://doi.org/10.1111/gcb.12379>
- Lal R. Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 2008. Vol. 363. P. 815–830.
- Milne E., Al-Adamat R., Batjes N., Bernoux M., Bhattacharyya T., Cerri C.C., Cerri C.E.P., Coleman K., Easter M.J., Falloon P., Feller C., Gicheru P., Kamoni P., Killian K., Pal D.K., Paustian K., Powlson D.S., Rawajfeh Z., Sessay M., William S., Wokabi S.M. National and sub national assessments of soil organic carbon stocks and changes: the GEFSOC modelling system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2007. Vol. 122. No. 1. P. 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.01.002>
- Minasny B., Malone B.P., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouays D., Chambers A., Chaplot V., Chen Z.-S., Cheng K., Das B.S., Field D.J., Gimona A., Hedley C.B., Hong S.Y., Mandal B., Marchant B.P., Martin M., McConkey B.G., Mulder V.L., O'Rourke Sh., Richer-de-Forges A.C., Odeh I., Padarian J., Paustian K., Pan G., Poggio L., Savin I., Stolbovoy V., Stockmann U., Sulaeman Yi., Tsui C.-C., Vågen T.-G., Wesemael B.V., Winowiecki L. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*. 2017. Vol. 292. P. 59–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- Oelkers E.H., Cole D.R. Carbon dioxide sequestration: a solution to the global problem. *Elements*. 2008. Vol. 4. No. 5. P. 305–310. <https://doi.org/10.2113/gselements.4.5.305>
- Smith P. Land use change and soil organic carbon dynamics. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2008. Vol. 81. P. 169–178. <https://doi.org/10.1007/s10705-007-9138-y>
- Shukla P.R., Skea J., Slade R., Al Khourdajie A., Van Diemen R., McCollum D., Pathak M., Some S., Vyas P., Fradera R., Belkacemi M. Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of working group III to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2022. Vol. 10. P. 9781009157926. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>
- Stockmann U., Adams M.A., Crawford J.W., Field D.J., Henakaarchchi N., Jenkins M., Minasny B., McBratney A.B., de Remy de Courcelles V., Singh K., Wheeler I., Abbott L., Angers D.A., Baldock J., Bird M., Brookes P.C., Chenu C., Jastrow J.D., Lal R., Lehmann J., O'Donnell A.G., Parton W.J., Whitehead D., Zimmermann M. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 2013. Vol. 164. P. 80–99. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001>

Received 27 July 2024

Accepted 08 August 2024

Published 05 September 2024

About the authors:

Mikhail A. Komissarov – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Soil Science in the Ufa Institute of biology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Ufa, Russia); Senior Researcher in the Laboratory of Climate Change Monitoring and Carbon Ecosystems Balance, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russia); mkomissarov@list.ru

Mikhail M. Ayvazyan – Postgraduate Researcher in the Laboratory of Soil Science in the Ufa Institute of biology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Ufa, Russia); Assistant in the Laboratory of Climate Change Monitoring and Carbon Ecosystems Balance, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russia); fencer90@mail.ru

Ilyusya M. Gabbasova – Doctor of Biological Sciences, Head of Laboratory of Soil Science in the Ufa Institute of biology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Ufa, Russia); Chief Researcher in the Laboratory of Climate Change Monitoring and Carbon Ecosystems Balance, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russia); gimib@mail.ru

Timur T. Garipov – Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher in the Laboratory of Soil Science in the Ufa Institute of biology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Ufa, Russia); Senior Researcher in the Laboratory of Climate Change Monitoring and Carbon Ecosystems Balance, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russia); timurgar@gmail.com

Ruslan R. Suleymanov – Doctor of Biological Sciences, Principal Researcher in the Laboratory of Soil Science in the Ufa Institute of biology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian

Academy of Sciences (Ufa, Russia); Head of the Laboratory of Artificial Intelligence in Environmental Research, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russia); soils@mail.ru

Nikolay I. Fedorov – Doctor of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Geobotany and Plant Resources in the Ufa Institute of biology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences (Ufa, Russia); Principal Researcher in the Laboratory of Climate Change Monitoring and Carbon Ecosystems Balance, Ufa State Petroleum Technological University (Ufa, Russia); fedorov@anrb.ru

Dmitry I. Rukhovich – Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Soil Informatics in the Federal State Budgetary Institution of Science Federal Research Center «V.V. Dokuchaev Soil Science Institute» (Moscow, Russia); landmap@yandex.ru

The authors read and approved the final manuscript



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