

DOI

УДК 631.417.1:631.417.2(470.57)

**ПИЛОТНЫЙ КАРБОНОВЫЙ ПОЛИГОН: АНАЛИЗ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА  
В ПОЧВАХ СЕЛЬХОЗУГОДИЙ****И. Г. Асылбаев, Р. Р. Мирсаяпов**

**Реферат.** Цикл углерода в агроэкосистемах определяется балансом между поглощением углекислого газа наземной растительностью сельскохозяйственных культур на создание органического вещества и выделением его при дыхании почв и растений. Почвы представляют собой мощный источник углекислоты и служат резервуаром для накопления органического углерода. Исследования проводили с целью анализа запасов органического углерода в почвах агроэкосистем и оценки эмиссии газов  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ . Работу выполняли в 2022–2023 годы на участке пилотного карбонового полигона (пашня) в Республике Башкортостан. В полевых и лабораторных экспериментах разрабатывали и тестировали технологии контроля выбросов углекислого газа на землях сельхозназначения. В полевых условиях заложены полнопрофильные почвенные разрезы и прикопки в соответствии с ГОСТ Р58595-2019 с определением морфологических свойств и отбором почвенных образцов для лабораторных исследований. Агрохимический анализ почвы на содержание органического вещества, плотность сложения, содержание подвижного фосфора и калия, величины рН позволил оценить запас углерода в почве карбонового полигона по методике Минприроды РФ. Общие запасы органического углерода пахотного горизонта на карбоновом полигоне составляют 503,8 т/га и зависят от занятости поля и особенностей сельскохозяйственной культуры. Результаты измерения деструкции углерода с использованием портативной камеры LI-COR 7810 свидетельствуют, что поля, в зависимости от способа их использования, отличаются по интенсивности выделения углекислого газа почвы – на участке под чистым паром эмиссия  $\text{CO}_2$  была в 2,18 раза ниже, чем под многолетними травами. Наличие данных о пространственном распределении органического почвенного углерода позволяет внедрить в практику земледелия углероддепонирующие севообороты с набором культур, способствующих максимальному поглощению атмосферного  $\text{CO}_2$  и других парниковых газов.

**Ключевые слова:** почвенный органический углерод, гумус, почва, секвестрация углерода.

**Введение.** Изменение климата в современных условиях вызвано повышением среднегодовой температуры поверхности Земли, обусловленным ростом концентрации в тропосфере парниковых газов, а именно  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{SF}_6$ ,  $\text{CF}_6$ ,  $\text{NF}_3$  и др. [1, 2]. Избыток парниковых газов формирует своего рода «купол» в атмосфере, улавливая инфракрасный спектр солнечной радиации у поверхности планеты, в результате чего возникает парниковый эффект, что способствует ее нагреванию. Чем больше концентрация газов, тем выше температура воздуха в атмосфере [2, 3, 4].

По данным Всемирной метеорологической организации, концентрация углекислого газа в 2020 году в атмосфере достигла 413,2 ppm, что на 149% больше доиндустриального уровня. Концентрация метана составила 262%, а закиси азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ) – 123% от уровня 1750 года. Именно тогда деятельность человека начала нарушать природное равновесие на Земле [2].

Ковда В. А. отмечал, что углекислый газ атмосферы на 90% имеет почвенное происхождение [5]. Органический углерод, аккумулирующийся в гумусе почв, служит источником поступления углекислого газа и метана в атмосферу в течении сотен лет [6]. Установлено [3], что в пределах России почвенный источник эмиссии  $\text{CO}_2$  значительно доминирует над техногенным, который оценивается в 0,78 млрд т  $\text{C-CO}_2/\text{год}$ .

На протяжении веков «здоровые» почвы смягчали негативные последствия потепления

климата [4]. Они в среднем содержат от 1500 до 2400 Гт С (1 Гт =  $1 \times 10^9$  т). На Россию приходится пятая часть мировых запасов почвенного органического углерода. Пул почвенного органического углерода, включая торфяные залежи, в метровом слое почвы на территории нашей страны составляет от 298 до 342 Гт С, или от 18 до 23% мировых запасов углерода в педосфере [7]. Размеры биомассы почвы почти в 700 раз больше, чем в океане, хотя на долю суши приходится менее 1/3 земной поверхности. При этом наиболее емкими природными резервуарами углерода выступают водно-болотные угодья или торфяники, образующиеся из не полностью разложившихся растений, где весь накопленный углерод остается связанным. В целом торфяники удерживают в себе почти половину заключенного в почвах углерода – 600 млрд т и ежегодно поглощают 370 млн т углекислого газа из атмосферы, хотя при этом занимают не более 3% мировой суши, или 400 млн га [2, 8].

Уровень накопления почвенного углерода выступает результатом сложного взаимодействия процессов поступления, стабилизации и потерь органического вещества, интенсивность которых определяют биоклиматические, литологические, геоморфологические и антропогенные факторы, что обуславливает его высокую пространственную вариабельность [9, 10].

Основным источником поступления органического вещества в почву служат пожнивные и корневые растительные остатки,

которые оказывают многостороннее действие на физические, химические и биологические свойства почвы, ее воздушный, температурный и пищевой режимы [10, 11, 12]. Существенную роль в регулировании углеродного баланса играет использование генетических ресурсов растений и микроорганизмов. При этом особое место отводится селекции сельскохозяйственных культур с мощной и активной корневой системой, сбалансированным распределением продуктов фотосинтеза между надземными и подземными органами, а также созданию консорциумов почвенных микроорганизмов для увеличения корней с последующим их накоплением в виде органического вещества и секвестрации почвенного углерода [13]. Растительные остатки выступают питательным и энергетическим субстратом для микроорганизмов, продуцентом низкомолекулярных органических соединений, имеющих принципиальное значение в метаболизме почвы, средством формирования почвенных агрегатов и улучшения структуры [14, 15, 16].

В докладе ЮНЕП (2017 г.) отмечалось, что агропромышленный комплекс и лесная отрасль выступают экономически эффективным и привлекательным средством для достижения цели Парижского соглашения по температуре. Сокращение выбросов парниковых газов предполагает необходимость лесоразведения, а также перехода к ресурсосберегающему земледелию [17, 18]. В этой связи, одна из приоритетных задач современного мира – мониторинг эмиссии и поглощения парниковых газов, депонирование углерода различными экосистемами и разработка научно-обоснованных мер и рекомендаций по его секвестрации (хранению) [16, 19, 20].

При снижении уровня содержания органического вещества в 30 см слое почвы на 1% в атмосферу выделяется около 45 т/га углерода, или 166 т/га углекислого газа. Следовательно, одним из важных факторов выброса парниковых газов выступают технологии обработки почвы, приводящие к уменьшению уровня органического вещества в почве [21]. При урожайности озимой пшеницы 4,0 т/га биомасса соломы составляет 4,6 т/га, поверхностных остатков – 1,21 т/га, корней – 2,9 т/га, при урожайности основной продукции кукурузы на силос 35,0 т/га масса поверхностных остатков достигает 4,5 т/га, корней – 1,6 т/га, после уборки подсолнечника формируется не менее 2,7 т/га побочной продукции и 1,5 т/га поверхностных остатков и корней. Таким образом, объемы поступления растительных остатков в почву зависят от вида севооборота, уровня плодородности поля, агротехнологии возделывания сельскохозяйственной культуры, урожайности, нормы высева, технологии уборки, немаловажную роль играют почвенно-климатические условия [22, 23, 24]. В исследованиях И. Шаркова [25] по результатам многолетних полевых опытов установлено, что в варианте с удалением соломы с поля

формировался наиболее дефицитный баланс углерода в почве (минус 752 кг С/га пашни), при оставлении соломы на поле величина этого показателя была почти на порядок меньше (минус 88 кг С/га пашни), независимо от фона основной обработки.

В Российской Федерации в 2021 году принят Федеральный закон «Об ограничении выбросов парниковых газов», утверждена «Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050», а Минобрнауки РФ начало реализацию пилотного проекта по созданию карбоновых полигонов для разработки и испытания технологий контроля углеродного баланса. В России карбоновые полигоны заложены в Чеченской Республике, Краснодарском крае, Республике Татарстан, Калининградской, Сахалинской, Свердловской, Новосибирской и Тюменской областях. На их примере разрабатывается методика измерения потоков и баланса основных парниковых газов для снижения их выброса [26]. Уфимским ГНТУ в консорциуме с Башкирским ГАУ и УФИЦ РАН в 2021 году получено госзадание Минобрнауки РФ «Программа создания и функционирования карбонового полигона на территории Республики Башкортостан «Евразийский карбоновый полигон» на 2022–2023 годы. Программа предусматривает реализацию проектов по разработке и тестированию технологий контроля выбросов углекислого газа на землях сельскохозяйственного назначения, лесного фонда и болотах.

Цель исследований – анализ запасов органического углерода в почвах агроэкосистем и оценка эмиссии газов  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  на участке пилотного карбонового полигона (пашня) для ретроспективного мониторинга и разработки мероприятий по депонированию углерода.

**Условия материалы и методы.** На сельскохозяйственных угодьях работу проводили на территории опытного поля Учебно-научного центра Башкирского государственного аграрного университета площадью 95 га. Объектом исследований служила почва – чернозем выщелоченный в Южной лесостепной почвенно-климатической зоне республики. Полевые почвенные обследования проводили согласно ГОСТР 58595-2019. Содержание органического вещества определяли методом Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91), подвижных соединений фосфора и калия – по методу Чирикова в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26204-91), рН солевой вытяжки – потенциометрическим методом (ГОСТ 26483-85).

Образцы массой около 500 г отбирали из генетических горизонтов почвенного профиля, доводили их до воздушно сухого состояния и направляли для последующего анализа в ФГБУ «Центр агрохимической службы «Башкирская», имеющее «Аттестат аккредитации испытательной лаборатории (центра) в системе аккредитации аналитических

лабораторий (центров)» № РОСС RU.0001.514153.

Кроме того, отбирали и анализировали почвенные образцы в посевах подсолнечника, кукурузы, многолетних трав, а также стерне озимых зерновых культур, на основании полученных результатов рассчитывали запасы почвенного органического углерода под этими культурами и общие по полигону.

Согласно методике количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощения парниковых газов [27] содержание углерода в органическом веществе почв принимали равным 58%. Запасы углерода в пахотном слое почвы рассчитывали по формуле:

$$C_{\text{почва}} = C_{\text{орг}} \times h \times d_v \times 58 / 100,$$

где  $C_{\text{почва}}$  – запас углерода в пуле почвы, т/га;  
 $C_{\text{орг}}$  – содержание органического вещества в смешанном почвенном образце, %;  
 $h$  – мощность горизонта почвы, см (например, 20 – при отборе в слое 0...20 см и 30 – при отборе в слое 0...30 см и так далее);  
 $d_v$  – плотность почвы, г/см<sup>3</sup>;  
 58 / 100 – коэффициент для перевода в единицы углерода.

Расчёт общего запаса углерода на опытном поле под культурами осуществляли по формуле:

$$C_{\text{total}} = C_{\text{pool}} * A$$

где  $C_{\text{total}}$  – валовые запасы углерода в почвенном контуре, т;  
 $C_{\text{pool}}$  – запасы углерода в слое почвы, т/га;  
 $A$  – площадь почвенного контура, га [28].

На исследуемом участке был заложен почвенный разрез глубиной 120 см, выделено шесть генетических горизонтов:

$A_{\text{пах}}$  (0...27 см) – темно-серая, комковато-пылеватая рассыпчатая структура, рыхлое сложение, среднесуглинистый гранулометрический состав, корневые остатки, переход в следующий горизонт постепенный;

$A_1$  (27...38 см) – темно-серая, зернисто-комковато рассыпчатая структура, уплотненный, тяжелосуглинистый гранулометрический состав, переход постепенный;

$A_1B$  (38...55 см) – серая с буроватым оттенком, ореховатая рассыпчатая структура, плотное сложение, тяжелосуглинистый гранулометрический состав, переход заметный;

$B$  (55...69 см) – бурая, ореховато-призматическая структура, плотное сложение, тяжелосуглинистый гранулометрический состав, гумусовые затеки и кротовины, переход постепенный;

$BC$  (69...98 см) – светло-бурой окраски с сероватым оттенком, ореховато-призматическая структура, плотное сложение, тяжелосуглинистый гранулометрический состав, гумусовые затеки и кротовины, переход постепенный;

$C$  (98...120 см) – материнская порода, делювиальные карбонатные глины.

Измерение эмиссии газов осуществляли камерным методом с использованием газоанализатора Li-COR 7810.

Замеры эмиссии потоков метана и углекислого газа проводили в посевах кукурузы, подсолнечника, озимой пшеницы, многолетних трав и в паровых полях карбонового полигона в летний и осенний периоды (рисунок).



Рисунок – Замеры потоков газов  $CH_4$ ,  $CO_2$ , на пару и под озимыми культурами

**Результаты и обсуждение.** Содержание гумуса в почве – важнейший показатель ее окультуренности. В нем аккумулировано 98% запасов почвенного азота, 60% фосфора, 80% серы, большое количество других макро- и микроэлементов. Содержание гумуса резко убывает вниз по профилю почвы (табл. 1).

Запасы органического углерода

в гумусовом горизонте составляют 200,3 т/га, в метровом слое – 257,5 т/га, что согласно имеющейся карте его распределения в почвах на территории Российской Федерации [1] соответствует высокому уровню. Плотность сложения почвы изменяется от 1,1 г/см<sup>3</sup> в гумусово-аккумулятивном до 1,4 г/см<sup>3</sup> в иллювиальном горизонте.

Таблица 1 – Агрохимические свойства и запасы почвенного органического углерода чернозема выщелоченного

Горизонт	Координаты	Гумус, %	C <sub>почва</sub> , т/га	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг	K <sub>2</sub> O, мг/кг	pH <sub>KCl</sub>
Апах	54.782719 55.770576	6,3	200,3	123	100	4,8
A <sub>1</sub>		5,5		92	80	5,0
A <sub>1</sub> B		3,9		71	70	5,3
B		1,5	-	92	70	5,5
BC		1,3	-	110	65	6,2
C		0,2	-	26	65	7,1

Средневзвешенное содержание гумуса в пахотном слое под разными культурами на полях карбонового полигона варьирует от 6,7 до 7,4%, что по Орлову Д. С. [29] соответствует среднему уровню обеспеченности.

Мощность пахотного горизонта составляет 27 см, плотность сложения почвы варьирует от 1,0 до 1,2 г/см<sup>3</sup>, что соответствует оптимальной величине этого показателя. Общие запасы органического углерода в агроэкосистемах карбонового полигона составляли 503,8 т, отдельно под культурами они варьировали от 120,6 до 136,7 т/га (табл. 2).

Высокое содержание гумуса и соответственно его запасы, как и следовало ожидать, отмечены под многолетними травами, так как при их возделывании в севообороте масса корневых и пожнивных остатков в аналогичном объеме увеличивается на 4...5 т/га, что соответствует 15...17 т навоза, вследствие чего образуется от 1,0 до 1,2 т гумуса [30, 31].

По количеству растительных остатков возделываемые культуры образуют ледующий ряд в убывающем порядке: многолетние травы – озимая пшеница – кукуруза – подсолнечник.

Таблица 2 – Агрохимические свойства почвы и запасы почвенного органического углерода в пахотном горизонте под разными культурами

№ поля	Культура	Координаты	Гумус, %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг	K <sub>2</sub> O, мг/кг	pH <sub>KCl</sub>	C <sub>почва</sub> , т/га	C <sub>total</sub> , т
1	Кукуруза	54.782697 55.770105	6,7	128	110	4,6	120,6	503,8
2	Подсолнечник	54.783134 55.769596	6,7	105	90	4,7	120,6	
3	Стерня (озимая пшеница)	54.782269 55.769334	6,7	75	75	4,7	125,9	
4	Многолетние травы	54.781584 55.771544	7,4	74	70	4,8	136,7	

В почве карбонового полигона содержание подвижных форм фосфора составляет от 38 до 82 мг/кг, подвижного калия – от 70 до 110 мг/кг. Реакция почвенного раствора, определенная в солевой вытяжке (pH<sub>KCl</sub>), в верхнем гумусовом горизонте среднекислая

pH 4,6...4,8, гранулометрический состав – тяжелосуглинистый. Плотность сложения почвы варьировала от 1,15 г/см<sup>3</sup> на кукурузе и подсолнечнике, до 1,18 г/см<sup>3</sup> – на многолетних травах и 1,2 г/см<sup>3</sup> – на стерне озимых зерновых культур.

Таблица 3 – Изменения потоков CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> в почве на разных сельскохозяйственных угодьях

Поле/культура	LI-7810 FCO <sub>2</sub> _D RY [umol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	LI-7810 FCH <sub>4</sub> _D RY [nmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	LI-8200 DOY initial value	CHAMBER Temperature initial value [°C]	LI-8200 Pressure initial value [kPa]	VOLUME TOTAL [cm <sup>3</sup> ]	CHAMBER COLLAR HEIGHT [cm]
Пашня, чистый пар	0,32450	-0,07770	273,49672	6,89947	100,73	1954,96	6,0
Кукуруза	0,73987	-0,23065	273,50036	7,38958	100,72	1636,96	5,0
Подсолнечник	0,71467	-0,16921	273,50632	7,07903	100,75	2590,96	8,0
Стерня, зерновые	0,31394	-0,11668	273,51297	7,10392	100,74	2272,96	7,0
Многолетние травы	2,50335	-0,82474	273,52014	7,58298	100,78	2431,96	7,5
Озимые	0,46610	-0,14216	273,53439	7,79479	100,83	2272,96	7,0

На всех объектах исследования наблюдали эмиссию CO<sub>2</sub> и поглощение поверхностью почвы метана (табл. 3). Эмиссия CO<sub>2</sub> связана с чистым дыханием экосистемы и отсутствием фотосинтезирующей зеленой растительности. Интенсивность выделения углекислого газа почвы варьировала в зависимости от занятости поля и наличия сельскохозяйственных культур. На стерне зерновых культур и в чистом пару эмиссия CO<sub>2</sub> была ниже в 7,8 раза, по сравнению с многолетними травами, скорость выделения составляла 0,31...0,32 и 2,5 мкмоль/м<sup>2</sup>с соответственно. Такая ситуация объясняется, по всей видимости, биологическими факторами, а именно наличием микроорганизмов и интенсивностью обмена веществ.

Эмиссия CO<sub>2</sub>, под озимыми зерновыми культурами, кукурузой и подсолнечником занимала промежуточное положение – 0,46...0,73 мкмоль/м<sup>2</sup>с. Поглощение CH<sub>4</sub> связано с достаточными условиями почвенного увлажнения и, как следствие, высокой обводненностью верхнего почвенного горизонта в осенний период.

**Выводы.** Запасы почвенного органического углерода в агроэкосистемах варьируют

от 120,6 до 136,7 т/га в зависимости от занятости поля, более высокое содержание гумуса и его запасы отмечены под многолетними травами.

На всех объектах исследования отмечена эмиссия CO<sub>2</sub>, связанная с чистым дыханием экосистемы и отсутствием фотосинтезирующей растительности. Интенсивность выделения углекислого газа изменялась в зависимости от наличия сельскохозяйственных культур. Минимальная в опыте эмиссия CO<sub>2</sub> выявлена на стерне зерновых культур и в поле чистого пара (0,31...0,32 мкмоль/м<sup>2</sup>с), максимальная – на поле с многолетними травами (2,5 мкмоль/м<sup>2</sup>с), промежуточные величины отмечены под озимыми зерновыми культурами, кукурузой и подсолнечником (0,46...0,73 мкмоль/м<sup>2</sup>с).

**Сведения об источнике финансирования.** Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Программа создания и функционирования карбонового полигона на территории Республики Башкортостан «Евразийский карбоновый полигон» на 2022–2023 годы (Номер для публикаций: FEUR-2022-0001).

#### Литература

1. Национальный атлас почв Российской Федерации / Н. А. Аветов, А. Л. Александровский, И. О. Алябина и др. М.: Астель: АСТ. 2011. 632 с.
2. Полигон будущего климата // Департамент природопользования и охраны окружающей среды города Москвы. URL: <https://climate-change.moscow/article/poligon-budushchego-klimata>. (дата обращения: 29.04.2021).
3. Кудеяров В. Н., Демкин В. А., Комаров А. С. Природная и антропогенная эволюция почв, круговорот углерода в ландшафтах в связи с изменениями климата и катастрофическими явлениями // Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ним техногенные катастрофы. Т. 4. Пушино; М.: ИФХ и БПП РАН, ИФЗ РАН, 2008. С. 13–35.
4. Битва за климат: карбоновое земледелие как ставка России // Экспертный доклад / М. П. Орлов, К. В. Пиксендеев, Ю. Е. Ровнов и др. / под ред. А. Ю. Иванова, Н. Д. Дурманова. М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2021. 120 с.
5. Ковда В. А. Основы учения о почвах. В 2 кн. М.: Наука, 1973. Кн. 1. 447 с. Кн. 2. 468 с.
6. 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.
7. Пилотный карбоновый полигон в России: анализ запасов углерода в почвах и растительности / И. Н. Курганова, В. О. Лопес де Гереню, С. Л. Ипп и др. // Почвы и окружающая среда. 2022. Т. 5. № 2. С. 6–21. doi: 10.31251/pos.v5i2.169.
8. Мировая климатическая повестка. Почвозащитное ресурсосберегающее (углеродное) земледелие как стандарт межнациональных и национальных стратегий по сохранению почв и аграрных карбоновых рынков / В. И. Беляев, А. В. Арлагин, В. К. Дригидер и др. // Международный сельскохозяйственный журнал. 2022. Т. 65. № 1. С. 421–441.
9. Чернова О. В., Рыжова И. М., Подвезенная М. А. Оценка запасов органического углерода лесных почв в региональном масштабе // Почвоведение. 2020. № 3. С. 340–350.
10. 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 (392). С. 192–196.
11. Иванова Т. Н., Багаутдинов Ф. Я., Асылбаев И. Г. Изменение содержания и состава гумуса черноземов выщелоченных (Luvic Chernozems) Южной лесостепи Республики Башкортостан при сельскохозяйственном использовании // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. 2015. № 1 (33). С. 19–23.
12. Влияние агробиотехнологий на запасы и состав органического вещества чернозема типичного слабоэродированного / Н. П. Масютенко, А. В. Кузнецов., М. Н. Масютенко и др. // Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 35. № 10. С. 45–50.
13. Органическое удобрение – эффективный фактор оздоровления почвы и индуктор её супрессивности / М. С. Соколов, Ю. Я. Спиридонов, А. П. Глинушкин и др. // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 1. С. 4–12.
15. Crops for Carbon Farming / С. Jansson, С. Faiola, А. Wingler, et al. // Frontiers in Plant Science. 2021. Vol. 12. 636709. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8211891/> (дата обращения: 03.04.2023). doi: 10.3389/fpls.2021.636709.
16. Семенов В. М., Когут Б. М. Почвенное органическое вещество // М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
17. Кудеяров В. Н. Почвенно-биогеохимические аспекты состояния земледелия в Российской Федерации // Почвоведение. 2019. № 1. С. 109–121.
18. Глобальный климат и почвенный покров – последствия для землепользования России / А. Л. Иванов, И. Ю. Савин, В. С. Столбовой и др. // Бюллетень Почвенного института имени В. В. Докучаева. 2021. № 107. С. 5–32.

doi: 10.19047/0136-1694-2021-107-5-32.

19. Технологические особенности почвозащитного ресурсосберегающего земледелия (в развитие концепций ФАО) / М. С. Соколов, А. П. Глинушкин, Ю. Я. Спиридонов и др. // *Агрохимия*. 2019. № 5. С. 3–20. doi: 10.1134/S000218811905003X.

20. Agriculture and climate change Reducing emissions through improved farming practices/ J. Ahmed, E. Almeida, D. Aminetzah, et al. McKinsey & Company. 2020. 45 p. URL: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/agriculture/our%20insights/reducing%20agriculture%20emissions%20through%20improved%20farming%20practices/agriculture-and-climate-change.pdf> (дата обращения: 03.04.2023).

19. Сафин Р. И., Валиев А. Р., Колесар В. А. Современное состояние и перспективы развития углеродного земледелия в Республике Татарстан // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2021. № 3 (63). С. 7–13.

21. Pandey D., Agrawal M., Pandey J. S. Carbon footprints: current methods of estimation // *Environ Monit Assess*. 2011. Vol. 178. P. 135–160.

22. Пути снижения выброса в атмосферу диоксида углерода на производственных процессах в растениеводстве / Р. Н. Хафизов, Ф. Х. Халиуллин, К. А. Хафизов и др. // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2021. Т. 16. № 3 (63). С. 38–42.

23. Влияние пожнивных остатков на состав органического вещества чернозема выщелоченного в лесостепи Западной Сибири / И. Н. Шарков, Л. М. Самохвалова, П. В. Мишина и др. // *Почвоведение*. 2014. № 4. С. 473–479.

24. Амиров М. Ф. Интенсивность усвоения углерода полевыми культурами в зависимости от технологии возделывания в условиях Республики Татарстан // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2021. Т. 16. № 3 (63). С. 14–18.

25. Агротехнологический потенциал управления органическим углеродом чернозёмов обыкновенных в зернопаропропашном севообороте / И.Т. Хусниев, В.А. Романенков, С.В. Пасько и др. // *Российская сельскохозяйственная наука*. 2022. № 3. С. 38–44.

26. Влияние минимизации обработки на баланс углерода в почве в лесостепи Новосибирского Приобья / И. Н. Шарков, В. А. Андроханов, Л. М. Самохвалова и др. // *Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет)*. 2023. № 1 (66). С. 99–106.

27. Об ограничении выбросов парниковых газов: Федеральный закон Российской Федерации от 02.07.2021 г. №296-ФЗ: Принят Гос. Думой Федер. Собр. Рос. Федерации 1 июня 2021 г.: одобрен Советом Федерации Федер. Собр. Рос. Федерации 23 июня 2021 г. // *Рос. газ*. 2021. 07 июля.

28. Об утверждении методических указаний по количественному определению объема поглощения парниковых газов: Распоряжение Минприроды России от 30.06.2017 № 371.

29. Оценка запасов органического углерода в почвенном покрове островных экосистем Куйбышевского водохранилища / В.И. Кулагина, С.С. Рязанов, Р.Р. Шагидуллин и др. // *Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. Биология. Химия*. 2021. Т. 7. № 3. С. 112–126.

30. Орлов Д. С., Бирюкова О. Н., Суханова Н. И. Дополнительные показатели гумусного состояния почв и их генетических горизонтов // *Почвоведение*. 2004. № 8 С. 918–926.

31. Рекомендации по сохранению и повышению плодородия почв Республики Башкортостан на 2001–2004 годы на основе адаптивно-ландшафтного земледелия / И. К.Хабиров, В. Д. Недорезков, Ф. Х. Хазиев и др. // *Уфа: БГАУ*, 2000. 164 с.

#### Сведения об авторах:

Асылбаев Ильгиз Галлямович – доктор биологических наук, профессор, старший научный сотрудник лаборатории искусственных экосистем и декарбонизации, e-mail: [ilgiz\\_bsa@mail.ru](mailto:ilgiz_bsa@mail.ru)

Мирсайпов Рамиль Рубисович – кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории искусственных экосистем и декарбонизации, e-mail: [mirsaj@bk.ru](mailto:mirsaj@bk.ru)

Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия.

## PILOT CARBON LANDFILL: ANALYSIS OF CARBON RESERVES IN FARMLAND SOILS

I. G. Asylbaev, R. R. Mirsayapov

**Abstract.** The carbon cycle in agroecosystems is determined by the balance between the absorption of carbon dioxide by terrestrial vegetation of agricultural crops to create organic matter and its release during soil respiration. The soil cover is a powerful source of carbon dioxide and serves as a reservoir accumulating soil organic carbon. Organic carbon accumulating in the humus of soils serves as a drain of carbon dioxide, methane into the atmosphere for hundreds of years. The research was carried out in order to analyze the reserves of organic carbon in the soils of agroecosystems and assess the emission of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> gases. The work was carried out in 2022–2023 at the site of a pilot carbon landfill (arable land) in the Republic of Bashkortostan. In field and laboratory experiments, technologies for controlling carbon dioxide emissions on agricultural lands were developed and tested. In the field, full-profile soil sections and digs were laid in accordance with GOST R58595-2019 with the determination of morphological properties and the selection of soil samples for laboratory analysis. Agrochemical analysis of the soil for the content of organic matter, the density of addition, the content of mobile phosphorus and potassium, the pH value allowed us to estimate the carbon stock of the soil of the carbon landfill according to the methodology of the Ministry of Natural Resources of the Russian Federation. The total reserves of organic carbon of the arable horizon at the carbon-new landfill amount to 503.8 t/ha, which vary and depend on the employment of the field and the characteristics of the agricultural crop. Measurement of the destructive part of the carbon cycle using a portable LI-COR 7810 camera showed that the fields occupied by crops differ in the intensity of the release of soil carbon dioxide – in the field under pure steam, CO<sub>2</sub> emissions were 2.18 times lower than under perennial grasses. The availability of data on the spatial distribution of organic soil carbon makes it possible to introduce carbon-dependent crop rotations with a set of crops that contribute to the maximum absorption of atmospheric CO<sub>2</sub> and other greenhouse gases into the practice of agriculture.

**Key words:** soil or organic carbon, humus, soil, emission, carbon sequestration.

#### References

1. Avetov NA, Aleksandroviy AL, Alyabina IO. *Natsional'nyi atlas pochv Rossiiskoi Federatsii*. [National atlas of soils of the Russian Federation]. Moscow: Astel': AST. 2011; 632 p.

2. Polygon of the future climate. [Internet]. Department of Natural Resources and Environmental Protection of the City of Moscow. [cited 2021, April 29]. Available from: <https://climate-change.moscow/article/poligon-budushchego-klimata>.

3. Kudayarov VN, Demkin VA, Komarov AS. [Natural and anthropogenic evolution of soils, carbon cycle in landscapes in connection with climate changes and catastrophic phenomena]. *Izmenenie okruzhayushchei sredy i klimata. Prirodnye i svyazannye s nim tekhnogennye katastrofy*. Vol.4. Pushchino; Moscow: IFKh i BPP RAN, IFZ RAN, 2008; 13–35 p.

4. Ivanov AYu, Durmanov ND. [The battle for climate: carbon agriculture as Russia's bet]. Ekspertnyi doklad. Expert report of Orlov M.P., Piskendeev K.V., Rovnov Yu.E. Moscow: Izd. dom Vyshei shkoly ekonomiki. 2021; 120 p.
5. Kovda VA. Osnovy ucheniya o pochvakh. [Fundamentals of the soils study]. Moscow: Nauka. 1973; Vol.1. 447 p. Vol.2. 468 p.
6. Abakumov EV, Polyakov VI, Chukov SN. [Approaches and methods for studying organic matter in soils of carboniferous polygons in Russia (review)]. Pochvovedenie. 2022; 7. 773-786 p.
7. Kurganova IN, Lopes de Gerenyu VO, Ipp SL. [Pilot carbon test site in Russia: analysis of carbon reserves in soils and vegetation]. Pochvy i okruzhayushchaya sreda. 2022; Vol.5. 2. 6-21 p. doi: 10.31251/pos.v5i2.169.
8. Belyaev VI, Arlagin AV, Dridiger VK. [World climate agenda. Soil-protective resource-saving (carbon) agriculture as a standard for interethnic and national strategies for soil conservation and agricultural carbon markets]. Mezhdunarodnyi sel'skokhozyaistvennyi zhurnal. 2022; Vol.65. 1. 421-441 p.
9. Chernova OV, Ryzhova IM, Podvezennaya MA. [Assessment of organic carbon reserves of forest soils on a regional scale]. Pochvovedenie. 2020; 3. 340-350 p.
10. Sidorova VA, Yurkevich MG, Bakhmet ON. [Modeling of the vertical distribution of carbon content in soils under different types of land use]. Mezhdunarodnyi sel'skokhozyaistvennyi zhurnal. 2023; 2 (392). 192-196 p.
11. Ivanova TN, Bagautdinov FYa, Asylbaev IG. [Changes in the content and composition of humus in leached chernozems (Luvic Chernozems) of the Southern forest-steppe of the Republic of Bashkortostan during agricultural use]. Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2015; 1 (33). 19-23 p.
12. Masyutenko NP, Kuznetsov AV, Masyutenko MN. [The influence of agrobiotechnologies on the reserves and composition of organic matter in typical slightly eroded chernozem]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2021; Vol.35. 10. 45-50 p.
13. Sokolov MS, Spiridonov YuYa, Glinushkin AP. [Organic fertilizer is an effective factor in soil health and an inducer of its suppressiveness]. Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2018; Vol.32. 1. 4-12 p.
14. Jansson C, Faiola C, Wingler A. Crops for carbon farming. [Internet]. Frontiers in Plant Science. 2021; Vol.12. 636709. [cited 2023, April 03]. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8211891/>. doi: 10.3389/fpls.2021.636709.
15. Semenov VM, Kogut BM. Pochvennoe organicheskoe veshchestvo. [Soil organic matter]. Moscow: GEOS. 2015; 233 p.
16. Kudayarov VN. [Soil-biogeochemical aspects of the state of agriculture in the Russian Federation]. Pochvovedenie. 2019; 1. 109-121 p.
17. Ivanov AL, Savin IYu, Stolbovov VS. [Global climate and soil cover - consequences for land use in Russia]. Byulleten' Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva. 2021; 107. 5-32 p. doi: 10.19047/0136-1694-2021-107-5-32.
18. Sokolov MS, Glinushkin AP, Spiridonov YuYa. [Technological features of soil-protective resource-saving agriculture (in development of FAO concepts)]. Agrokimiya. 2019; 5. 3-20 p. doi: 10.1134/S000218811905003X.
19. Ahmed J, Almeida E, Aminetzah D. Agriculture and climate change Reducing emissions through improved farming practices. [Internet]. McKinsey & Company. 2020; 45 p. [cited 2023, April 03]. Available from: <https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/industries/agriculture/our%20insights/reducing%20agriculture%20emissions%20through%20improved%20farming%20practices/agriculture-and-climate-change.pdf>.
20. Safin RI, Valiev AR, Kolesar VA. [Current state and prospects of carbon farming development in the Republic of Tatarstan]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021; 3 (63). 7-13 p.
21. Pandey D, Agrawal M, Pandey JS. Carbon footprints: current methods of estimation. Environ Monit Assess. 2011; Vol.178. 135-160 p.
22. Khafizov RN, Khaliullin FK, Khafizov KA. [Ways to reduce carbon dioxide emissions into the atmosphere during production processes in crop production]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021; Vol.16. 3 (63). 38-42 p.
23. Sharkov IN, Samokhvalova LM, Mishina PV. [The influence of crop residues on the composition of organic matter of leached chernozem in the forest-steppe of Western Siberia]. Pochvovedenie. 2014; 4. 473-479 p.
24. Amirov MF. [The intensity of carbon assimilation by field crops depending on cultivation technology in the conditions of the Republic of Tatarstan]. Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2021; Vol.16. 3 (63). 14-18 p.
25. Khusniev IT, Romanenkov VA, Pas'ko SV. [Agrotechnological potential for managing organic carbon of ordinary chernozems in grain-fallow crop rotation]. Rossiiskaya sel'skokhozyaistvennaya nauka. 2022; 3. 38-44 p.
26. Sharkov IN, Androkhonov VA, Samokhvalova LM. [The influence of minimizing tillage on the balance of carbon in the soil in the forest-steppe of Novosibirsk Ob region]. Vestnik NGAU (Novosibirskii gosudarstvennyi agrarnyi universitet). 2023; 1 (66). 99-106 p.
27. Ob ogranichenii vybrosov parnikovykh gazov: Federal'nyi zakon Rossiiskoi Federatsii ot 02.07.2021g. № 296-FZ. [On limiting greenhouse gas emissions: Federal Law of the Russian Federation dated July 2, 2021 No. 296-FZ]. Prinyat Gos. Dumoi Feder. Sobr. Ros. Federatsii 1 iyunya 2021g.: odobr. Sovetom Federatsii Feder. Sobr. Ros. Federatsii: 23 iyunya 2021g. // Ros. gaz. 2021. 07 iyulya.
28. Ob utverzhdenii metodicheskikh ukazanii po kolichestvennomu opredeleniyu ob'ema pogloshcheniya parnikovykh gazov. [On approval of guidelines for the quantitative determination of the volume of greenhouse gas absorption]. Rasporyazhenie Minprirody Rossii ot 30.06.2017 № 371.
29. Kulagina VI, Ryazanov SS, Shagidullin RR. [Assessment of organic carbon reserves in the soil cover of island ecosystems of Kuibyshev Reservoir]. Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I.Vernadskogo. Biologiya. Khimiya. 2021; Vol.7. 3. 112-126 p.
30. Orlov DS, Biryukova ON, Sukhanova NI. [Additional indicators of the humus status of soils and their genetic horizons]. Pochvovedenie. 2004; 8. 918-926 p.
31. Khabirov IK, Nedorezov VD, Khaziev FK. Rekomendatsii po sokhraneniyu i povysheniyu plodorodiya pochv Respubliki Bashkortostan na 2001-2004 gody na osnove adaptivno-landshaftnogo zemledeliya. [Recommendations for preserving and increasing soil fertility in the Republic of Bashkortostan for 2001-2004 based on adaptive landscape agriculture]. Ufa: BGAU. 2000; 164 p.

**Authors:**

Asylbaev Ilgiz Gallyamovich – Doctor of Biological Sciences, Professor, Senior Researcher of Artificial Ecosystems and Decarbonization Laboratory, e-mail: [ilgiz\\_bsau@mail.ru](mailto:ilgiz_bsau@mail.ru)  
 Mirsayapov Ramil Rubisovich – Ph.D. of Agricultural Sciences, Senior Researcher of Artificial Ecosystems and Decarbonization Laboratory, e-mail: [mirsaj@bk.ru](mailto:mirsaj@bk.ru)  
 Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia.