

<https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.3.470-498>

УДК 631.452:631.427: 631.423



Классические и современные подходы к изучению органического вещества дерново-подзолистых почв Среднего Предуралья (аналитический обзор)

© 2025. Н. Е. Завьялова , В. Р. Ямалтдинова, Д. Г. Шишков, С. С. Скрыбина, И. В. Казакова

Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, с. Лобаново, Пермский край, Российская Федерация

Представлены экспериментальные данные ученых Пермского НИИСХ – филиала ПФИЦ УрО РАН, полученные за 2000–2024 гг., обобщена и проанализирована научная литература за 1990–2024 гг. российских и иностранных специалистов по изучению почвенного органического вещества (ПОВ). Выявлены разнонаправленные тенденции изменения органического углерода в почве по сравнению с исходным уровнем при смене режима землепользования: уменьшение при интенсивной обработке почвы и отсутствии удобрений, сохранение и увеличение – при поступлении большого количества органического вещества с биомассой возделываемых культур в севообороте и органическими удобрениями. Показано влияние приемов землепользования на содержание различных фракций трансформируемого органического вещества. Установлено, что в почвенно-климатических условиях Среднего Предуралья потери органического углерода в процессе минерализации за вегетационный период потенциально могут составить от 2,37 до 3,21 % от его общего содержания. Определен высокий углеродсеквестрирующий потенциал дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы. Проведена оценка секвестрации углерода культурами севооборота и многолетними травами. Выявлено, что в процессе фотосинтеза козлятник восточный преобразует из атмосферы в биомассу растений более 30 т/га CO₂, или 8,4 т C/га в год, левзея сафлоровидная – 24,3–41,3 т/га CO₂ (6,8–11,5 т/га). За счет большого количества и благоприятного биохимического состава пожнивно-корневых остатков многолетних кормовых культур наблюдается накопление и депонирование органического углерода в почве. Исследование почвенного микробиома дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почв Среднего Предуралья выявили 17 филумов, состоящих из доменов Archaea (1 филум) и Bacteria (16 филумов). Обнаружены различия в составе почвенных микроорганизмов в почвах при различном землепользовании. Обозначены перспективы дальнейшего изучения ПОВ в связи с проблемой глобального изменения климата и развитием инструментальных высокоточных методов анализа.

Ключевые слова: приемы землепользования, удобрения, структура почвенного органического вещества, экофизиологические показатели, секвестрация углерода, анализ почвенного микробиома, обзор научной литературы

Благодарности: работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (тема АААА-А18-118021990053-3).

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Завьялова Н. Е., Ямалтдинова В. Р., Шишков Д. Г., Скрыбина С. С., Казакова И. В. Классические и современные подходы к изучению органического вещества дерново-подзолистых почв Среднего Предуралья (аналитический обзор). Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(3):470–498.

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.3.470-498>

Поступила: 14.05.2025

Принята к публикации: 16.06.2025

Опубликована онлайн: 30.06.2025

Classical and modern approaches to the study of organic matter of sod-podzolic soils in the Middle Pre-Urals (analytical review)

© 2025. Nina E. Zavyalova✉, Venera R. Yamaltdinova, Danil G. Shishkov, Sofia S. Scryabina, Inna V. Kazakova

Perm Agricultural Research Institute – branch of Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Lobanovo, Perm Region, Russian Federation

Experimental data of scientists of Perm Agricultural Research Institute – branch of PFRC UB RAS obtained for 2000–2024 are presented, scientific literature for 1990–2024 of Russian and foreign specialists on the study of soil organic matter (SOM) is summarized and analyzed. Multidirectional tendencies of organic carbon change in soil compared to the initial level at change of land use regime were revealed: decrease at intensive tillage and absence of fertilizers, preservation and increase – at input of large amount of organic matter with biomass of cultivated crops in crop rotation and organic fertilizers. The influence of land use practices on the content of different fractions of transformed organic matter is shown. It has been established that in soil-climatic conditions of the Middle Urals the losses of organic carbon in the process of mineralization during the vegetation period can potentially make from 2.37 to 3.21 % of its total content. High carbon sequestering potential of sod-podzolic heavy loamy soil was determined. Carbon sequestration by crops of crop rotation and perennial grasses was assessed. It was revealed that in the process of photosynthesis eastern galega converts from atmosphere to plant biomass more than 30 t/ha of CO₂ or 8.4 t C/ha per year, safflower leuzea – 24.3–41.3 t/ha of CO₂ (6.8–11.5 t/ha). Due to the large amount and favourable biochemical composition of crop-root residues of perennial fodder crops, accumulation and deposition of organic carbon in the soil is observed. The study of soil microbiome of sod-podzolic heavy loamy soils of the Middle Urals revealed 17 phylums consisting of Archaea (1 phylum) and Bacteria (16 phylums) domains. Differences in the composition of soil microorganisms in soils of different types of land use were found. Prospects for further study of SOM are outlined in connection with the problem of global climate change, as well as the development of instrumental high-precision methods of analysis.

Keywords: land use practices, fertilizers, soil organic matter structure, ecophysiological indicators, carbon sequestration, soil microbiome analysis, scientific literature review

Acknowledgements: the research was carried out under the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the state assignment of Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (theme No. AAAA-A18-118021990053-3).

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors stated no conflict of interest.

For citation: Zavyalova N. E., Yamaltdinova V. R., Shishkov D. G., Scryabina S. S., Kazakova I. V. Classical and modern approaches to the study of organic matter of sod-podzolic soils in the Middle Pre-Urals (analytical review). *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(3):470–498. (In Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.3.470-498>

Received: 14.05.2025

Accepted for publication: 16.06.2025

Published online: 30.06.2025

Органическое вещество (ОВ) рассматривается как классификационный признак почвы и ключевой показатель ее качества и «здоровья» [1, 2, 3]. Способность почвы создавать необходимые условия для развития сельскохозяйственных культур и формирования высоких урожаев неразрывно связана с запасами ОВ в ней. Изучение антропогенной трансформации органического вещества – необходимое условие для выявления причин низкого плодородия почвы, определения направлений использования и охраны земельных ресурсов. Важнейшая роль природных экосистем – регуляция цикла углерода, который определяет устойчивость функционирования агроценозов в условиях длительного интенсивного сельскохозяйственного использования пашни и обеспечивает её экологические функции [4].

Почвенное органическое вещество (ПОВ) принято подразделять на разные фракции и пулы, которые получают из почвы химическим, биологическим и физическим фракционированием [1, 5, 6]. Роль трансформируемых

(активных) и инертных (стабильных) пулов в почвенном плодородии неодинакова [7, 8, 9]. Трансформируемая часть ОВ ($S_{\text{транс}}$) служит наиболее доступным источником питания растений, определяет биологическую активность и агрохимические свойства почв и заметно изменяется под влиянием различных агротехнических приемов. Трансформируемая часть ОВ участвует в круговороте углерода и других элементов, формирует основные функции органического вещества и определяет эффективное плодородие почвы. В состав трансформируемого органического вещества, извлекаемого из почвы растворителями различной жесткости (вода, растворы солей, щелочей и др.), входят подвижные формы углерода, содержание которых в почве влияет на урожай возделываемой культуры. Содержание подвижного (лабильного) органического вещества (ЛОВ, $S_{\text{лаб}}$) в почве зависит от различных природных и антропогенных факторов [10, 11]. Очевидно, что для каждого региона и типа почвы концен-

трация лабильного органического вещества будет неодинаковой.

В качестве одного из индикаторов обеспечения почв трансформируемым органическим веществом используют содержание в почве потенциально минерализуемого углерода ($C_{\text{пм}}$) [12]. Этот показатель отражает количество углерода, минерализуемого в конкретной агроэкосистеме за период времени, равный по продолжительности вегетационному сезону.

Исходя из того, что почвенная суспензия представляет собой гетерогенную систему, предложен способ физического фракционирования суспензии и выделения фракции дисперсного органического вещества (particulate organic matter, POM), которая чувствительна к изменениям агротехники, хорошо отражает изменения качества почвенного органического вещества, вызванные сменой систем земледелия [13, 14].

Инертный углерод является своеобразным «органическим скелетом» почвы [15]. По определению М. Кёршенса [16], эта часть углерода термодинамически и биологически наиболее устойчива и отражает генетические особенности почв. При длительном экстенсивном использовании почвы активная часть ОВ может пополняться за счет инертной, что вызывает деградацию почв. Пул так называемого инертного гумуса отождествляется с величиной минимального содержания гумуса в почве при бессменном длительном (более 20 лет) паровании почвы.

В начале 2000-х годов активно начали обсуждать проблему парникового эффекта атмосферы Земли, появился новый термин – «почвенная секвестрация углерода», что привело к изучению органического вещества почвы новый импульс [17, 18, 19]. Основными резервуарами накопителями углерода являются наземная растительная биомасса и почвенное органическое вещество. Примерно 40 % территории суши покрыто травянистыми растениями – их роль в секвестрации углерода чрезвычайно велика, в них содержится до 30 % глобальных запасов почвенного углерода. Уровень секвестрации углерода существенно зависит от фотосинтетической способности трав. По данным В. Г. Сычева с соавторами [20], объемы секвестрации естественным травостоем варьируют в пределах 2,2–2,5 т/га в год, в культурных агроценозах – 5,25 т/га углерода. На почвы России приходится 12 % площади почвенного

покрова мира, из них 87 % – естественные природные системы, которые находятся в стационарном состоянии. Потери органического вещества в наших почвах значительно ниже, чем в других странах, что связано с использованием ресурсосберегающих технологий, ограниченным применением минеральных удобрений, природно-климатическими условиями России.

В Пермском НИИСХ (филиал Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук) для исследования органического вещества дерново-подзолистых почв были использованы современные агрохимические, микробиологические и физико-химические методы, позволяющие выявить различия на уровне элементарного состава и структуры молекул гуминовых кислот, показать участие отдельных групп микроорганизмов в процессе трансформации ОВ.

Цель аналитического обзора – обобщить и проанализировать результаты комплексных исследований по изучению органического вещества пахотных и целинных дерново-подзолистых почв Среднего Предуралья для оценки трансформации ОВ при сельскохозяйственном использовании; определить приоритеты дальнейших исследований.

Материал и методы. Объектом исследования служила дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва (Eutric Albic Retisols (Abruptic, Loamic, Cutanic)) естественных экосистем (под смешанным лесом, злаково-разнотравным лугом); почва агроэкосистем под культурами севооборота в вариантах длительных стационарных опытов, под многолетней бобовой культурой – козлятником восточным (*Galéga orientalis*), под многолетней культурой семейства астровых – левзеей сафлоровидной (*Rhaphonticum carthamoides*).

Обобщены и проанализированы результаты исследований ученых Пермского НИИСХ по изучению органического вещества почвы, выполненные с 2000 по 2024 год. Классические и современные подходы к изучению ОВ отражены в 60 научных публикациях отечественных и зарубежных ученых за период 1990–2024 гг. Поиск тематических научных статей выполнен через научную электронную библиотеку и поисковые системы: eLIBRARY.RU, Scopus, Web of Science, РИНЦ, RSCI с выделением наиболее цитируемых и отражающих тематику аналитического обзора публикаций.

Основная часть. Органическое вещество дерново-подзолистых почв при различных приемах землепользования. Исследуемая почва является дерново-подзолистой тяжелосуглинистой, содержание физической глины варьирует от 40,2 до 43,7 % [21]. В естественных фитоценозах процессы синтеза и разложения органического вещества почвы уравновешены. Условия почвообразования под смешанным лесом способствовали накоплению гумуса в слое 3–20 см до 5,95 %, общего азота – до 2941 мг/кг. Кислотность почвенного раствора под лесной растительностью сформировалась на уровне pH_{KCl} 4,3, гидролитическая кислотность – 6,4 ммоль/100 г. Почва под злаково-разнотравным лугом имеет низкое содержание гумуса по классификации Тюриня, характеризуется среднекислой реакцией среды – pH_{KCl} 4,7, высоким содержанием подвижного фосфора по Кирсанову – 257 мг/кг почвы, обменного калия – 252 мг/кг, емкость катионного обмена (ЕКО) до 25,2 ммоль/100 г (табл. 1). Пахотная почва различных вариантов длительного стационарного опыта имеет слабокислую реакцию среды, высокое содержание подвижного фосфора и калия по Кирсанову, низкое содержание гумуса и общего азота. Почва типичного севооборота с двумя полями клевера и внесением навоза КРС в паровое поле по 40 т/га содержала на период обследования (2022 г.) гумуса в 1,3 раза больше, чем при закладке опыта (1977 г.). В варианте бессменного чистого пара без удобрений отмечено снижение гумуса на 29,1 %, в варианте бессменного ячменя – на 6,1 % относительно исходного уровня.

Плотность сложения почвы (d) зависела от типа землепользования. Максимальное значение плотности характерно для почвы бессменного чистого пара – 1,26 г/см³. На участках залежи и лесной почвы плотность верхних горизонтов была ниже, чем в пахотных вариантах – 1,20 и 0,9 г/см³ соответственно.

Основным источником накопления органических веществ в обрабатываемой почве является культура полевых растений, их корневые и пожнивные остатки. Оценить роль растений в формировании и обновлении почвенного органического вещества в условиях многолетнего стационарного опыта позволяет бессменный чистый пар, являясь уникальным вариантом. Установлено, что продолжительное парование, интенсивная обработка и отсутствие поступления растительных остатков истощает почву (рис. 1). В этих условиях установился минимальный для пахотных дерново-подзолистых почв данной территории уровень $\text{C}_{\text{орг}}$, равный 0,78 %. За 40 лет наблюдений в бессменно парующей почве в слое 0–20 см запасы органического углерода уменьшились на 8,3 т/га.

Возделывание бессменного ячменя без удобрений при одностороннем выносе питательных веществ и незначительном поступлении пожнивно-корневых растительных остатков в почву замедлило темпы минерализации органического вещества, изменило соотношение между выносом и поступлением этих элементов в системе «почва – растение». В настоящее время содержание органического углерода в почве под бессменным ячменем составляет 1,04 %, запасы углерода в слое 0–20 см – 25,6 т/га (табл. 2).

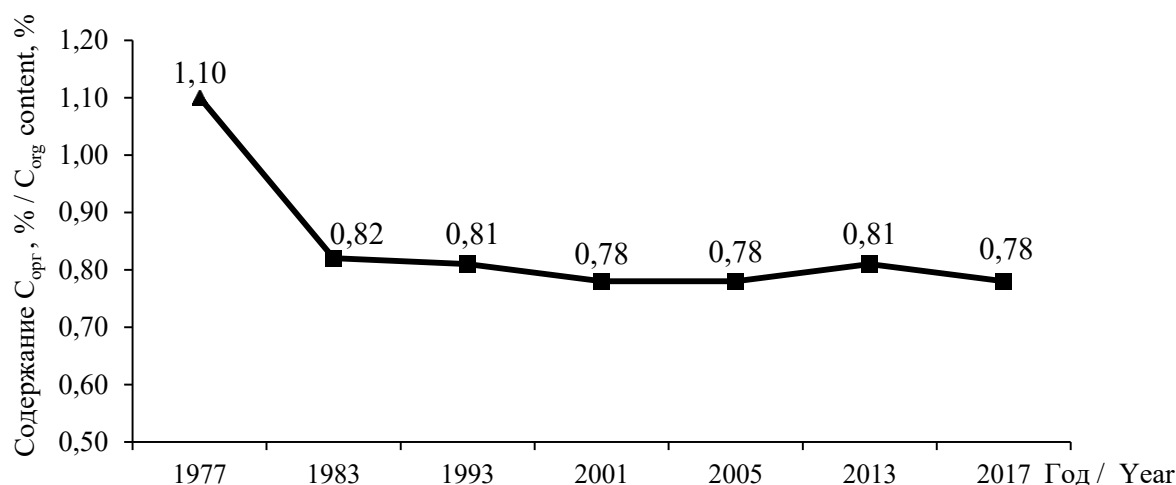


Рис. 1. Динамика содержания органического углерода в дерново-подзолистой почве (бессменный чистый пар, 1977–2017 гг.) /

Fig. 1. Dynamics of organic carbon content in sod-podzolic soil (continuous «black» fallow, 1977–2017)

Таблица 1 – Агрохимические показатели дерново-подзолистей почвы при различном землепользовании (2022 г.) /
Table 1 – Agrochemical parameters of sod-podzolic soil under various types of land use (2022)

Объект исследования / Object of the research	Слой почвы, см / Soil layer, cm	pH _{KCl}	S	H ₂	ЕКО	P ₂ O ₅	K ₂ O	Г _{гумус} , % / Humus, %	C : N	d _i , г/см ³ / g/cm ³	Содержание частиц <0,01 мм, % / Particle content <0.01 mm, %
Бессеменный чистый пар / Continuous «black» fallow	0–20	4,9	20,5	2,62	23,12	445	220	1,34	8,6	1,26	43,0
Бессеменный ячмень / Continuous barley	0–20	5,0	22,5	2,55	25,06	266	270	1,79	9,3	1,23	42,6
Типичный севооборот с унавоженным паром / Typical crop rotation with manured «black» fallow	0–20	5,2	21,8	2,13	26,58	323	296	2,45	10,0	1,24	42,9
Злаково-разнотравный луг / Grass-forb meadow	0–20	4,7	17,1	3,10	25,20	257	252	2,54	10,1	1,20	40,2
Смешанный лес / Mixed forest	3–20	4,3	18,3	6,40	22,20	162	216	5,95	11,9	0,90	43,7
НСР ₀₅ / LSD ₀₅	-	0,15	0,34	0,09	0,84	5,30	7,57	0,07	-	0,05	-

Таблица 2 – Содержание и запасы форм углерода при различном землепользовании (2022 г.) /
Table 2 – The content and reserves of various forms of carbon under different land uses (2022)

Вариант / Variant	Содержание / Content						Запасы / Reserve					
	C _{орг} / C _{org}	C _{транс} / C _{trans}	C _{лаб} / C _{lab}	C _{тн} / C _{pm}	C _{зсв} / C _{hve}	C _{орг} / C _{org}	C _{транс} / C _{trans}	C _{лаб} / C _{lab}	C _{тн} / C _{pm}	C _{зсв} / C _{hve}	C _{орг} / C _{org}	C _{лаб} / C _{lab}
Бессеменный чистый пар / Continuous «black» fallow	0,78	0	0,13	185,8	110	19,7	0	3,3	46,82	27,7	6,0	6,0
Бессеменный ячмень / Continuous barley	1,04	0,26	0,22	209,8	211	25,6	6,4	4,7	51,61	51,8	4,7	4,7
Типичный севооборот с унавоженным паром / Typical crop rotation with manured «black» fallow	1,42	0,64	0,24	312,4	201	35,2	15,9	5,8	77,48	49,9	5,8	5,8
Злаково-разнотравный луг / Grass-forb meadow	1,62	0,84	0,31	516,2	359	38,9	20,2	7,4	123,89	86,2	5,3	5,3
Смешанный лес / Mixed forest	3,45	2,67	0,87	-	1492	52,8	40,9	13,3	-	228,3	4,0	4,0
НСР ₀₅ / LSD ₀₅	0,09	-	0,03	19,1	35,8	-	-	-	-	-	-	-

Ведение типичного для зоны Среднего Предуралья севооборота с унавоженным паром и двумя полями клевера лугового позволило при совокупном взаимодействии биоресурсов возделываемых бобовых и зерновых культур повысить содержание органического углерода в дерново-подзолистой почве до 1,42 %, т. е. на 28,9 % относительно исходного. Запасы $C_{\text{орг}}$ в пахотном (0–20 см) слое составили 35,2 т/га, это ниже, чем в залежной почве на 3,7 т/га. В среднем за ротацию в данном севообороте, без внесения минеральных удобрений, в почву поступает около 28 т/га органического вещества в виде навоза, корневых и пожнивных растительных остатков.

За 45 лет нахождения почвы в залежном состоянии в ней установилось максимальное по [22] для естественных условий почвообразования содержание органического углерода – 1,62 %, что соответствует целинной почве региона исследований. Развитая растительность и обильная корневая система обеспечивают поступление большой массы органических остатков в почву залежи.

Максимальными запасами валового органического углерода в слое 3–20 см характеризуется почва под смешанным лесом, которые составляют 52,8 т/га. Величина отношения C:N равна 11,7, почва достаточно хорошо обогащена азотом, однако гумификация поступающего в почву леса свежего органического вещества в виде древесного опада и травянистой растительности протекает медленно ввиду их сложного химического состава. Содержание органического углерода стабилизировалось на уровне 3,45 %, процессы гумусообразования и минерализации органического вещества уравновешены.

Влияние приемов земледелия на трансформацию органического вещества почвы наиболее эффективно можно оценить по содержанию в ней различных пулов органического углерода [23]. Активная фракция почвенного органического вещества является значимой количественной характеристикой почвы и определяет направление и интенсивность многих биохимических процессов. Именно активное (трансформируемое) ОВ служит источником питания и энергии для растений и почвенных микроорганизмов. Общее содержание органического углерода в почве, выраженное через углерод, можно представить формулой: $C_{\text{общ}} = C_{\text{мин}} + C_{\text{транс}}$ [7], где $C_{\text{мин}}$ –

уровень содержания углерода, который устанавливается при длительном экстенсивном (бессменный пар) использовании почвы. Впервые такой подход к оценке органического вещества по наличию в нем устойчивых (неподдающихся минерализации) и трансформируемых (активных) компонентов использовал профессор М. Кёршенс [16]. Фракция трансформируемого углерода в длительном стационарном опыте, представленная компонентами с высокой химической и биологической активностью, в зависимости от приемов земледелия, составила от 0 до 2,67 % от массы почвы. Однако расчетный метод не дает точных результатов по определению трансформируемого ОВ. В длительно парующей почве нельзя считать $C_{\text{транс}}$ равным нулю, так как в ней постоянно идут процессы минерализации и гумусообразования за счет поступления малого количества сорной растительности, изменения гидротермических условий, попадания иностранных частиц пыли и т. д.

Более информативным показателем обеспеченности почв активным органическим веществом является содержание потенциально-минерализуемого органического вещества. Количественное значение потенциально минерализуемого углерода определяли путем измерения количества CO_2 за 20-суточный период лабораторной инкубации почвы (при 60 % ППВ и температуре 22 °C) и расчета по уравнениям, изложенным в работе Б. М. Когута и др. [6]. Согласно полученным данным, количество $C_{\text{пм}}$ в почве бессменного чистого пара составило 185,8 мг/кг (2,37 % от общего углерода), что меньше, чем в почве севооборота в 1,7 раза. В почве залежи сформировалось более высокое содержание потенциально минерализуемого углерода, его доля составила 3,21 % от общего углерода почвы. Таким образом, за вегетационный период в условиях, приближенных к лабораторному эксперименту по инкубированию, почва потенциально может потерять от 46,82 до 123,89 кг/га углерода в процессе минерализации органического вещества в зависимости от приемов земледелия.

Наиболее доступным для растений является органический углерод, экстрагируемый горячей водой ($C_{\text{эгв}}$) [24], в которую извлекаются подвижные гумусовые вещества с высокой обогащенностью азотом (C:N = 7,7–10,0). Кислая реакция почвенного раствора и большое

количество органического вещества кислой природы, поступающего в почву леса, оказали значимое влияние на $C_{эгв}$ – 1492 мг/кг. Минимальным содержанием углерода в водной вытяжке характеризуется почва бессменного чистого пара – 110 мг/кг, запасы водорастворимой фракции органического вещества составляют 27,7 кг/га, что в 8 раз меньше, чем в почве под смешанным лесом. Возделывание сельскохозяйственных культур практически в 2 раза повысило содержание легкодоступного для растений и микроорганизмов водорастворимого углерода относительно почвы, длительное время находящейся под паром. В почве залежи, где отсутствует механическая обработка и фитомасса не отчуждается, установилось динамическое равновесие между процессами минерализации и гумусообразования, содержание $C_{эгв}$ составило 359 мг/кг почвы.

Для дерново-подзолистых почв широко используется метод определения лабильного (активного) органического углерода в 0,1 М нейтральной пиродифосфатной вытяжке ($C_{лаб}$), в которую переходят наиболее «молодые» гумусовые вещества, не прочно связанные с минеральной частью почвы. Эта фракция реагирует на внешние воздействия, расходуется и восстанавливается при различном агро-техническом воздействии на почву [8]. Наши исследования показали, что в зависимости от типа землепользования, в нейтральный 0,1 М раствор пиродифосфата натрия перешло от 0,13 до 0,87 % органического углерода. В пахотной почве бессменного пара органический углерод представлен в основном инертным органическим веществом, составляющим почвенный каркас [6, 15], содержание лабильной части углерода минимально – 0,13 % от массы почвы.

Поступление растительных остатков в почву после уборки бессменно возделываемого ячменя, а также нахождение почвы под покровом культуры, способствовало увеличению $C_{лаб}$ до 0,22 %. Использование навоза и поступление в почву растительных остатков различного количества и качества в типичном севообороте не изменило существенно содержание лабильной части органического вещества почвы относительно бессменно возделываемой культуры, что, по-видимому, связано с высоким выносом элементов питания при возделывании сельскохозяйственных культур.

Залежная почва занимает промежуточное положение между почвой под лесом и пахотными почвами по содержанию углерода в водной и пиродифосфатной вытяжках.

Запасы органического углерода, извлекаемого нейтральным раствором пиродифосфата натрия, составляют основу активной части органического вещества почвы и являются существенным резервом питательных веществ, их количество варьирует в зависимости от приемов землепользования от 3,3 до 13,3 т/га.

Органическое вещество дерново-подзолистой почвы при длительном применении различных систем удобрения. Для дерново-подзолистых почв с низким природным уровнем плодородия внесение органических удобрений является основой воспроизводства плодородия почв и повышения продуктивности агроценозов. Многолетняя динамика $C_{орг}$ при применении различных систем удобрения в длительном стационарном опыте представлена на рисунке 2. Начальной точкой явилось исходное содержание $C_{орг}$ 1,25 %. Насыщение пашни навозом по 10 т/га обеспечило не только сохранение исходного уровня содержания органического углерода в течение шести ротаций севооборота, но и несколько повысило его. Уровень $C_{орг}$ составил в этом варианте 1,33 %, что на 6 отн. % выше, чем в исходной почве. Совместное внесение 10 т/га навоза и эквивалентного количества NPK способствовало увеличению $C_{орг}$ до 1,38 %. Тренды динамики $C_{орг}$ показывают, что к концу третьей ротации уровень $C_{орг}$ в почве приблизился к равновесному, и далее его количество слабо изменялось. При этом уровни содержания $C_{орг}$ установились различными в зависимости от применяемых систем удобрения: минимальный – в контроле без удобрений (1,15 %); максимальный – при насыщении пашни навозом по 10 т и внесении эквивалентного количества NPK под зерновые культуры (1,38 %).

Для каждого типа почв характерен свой органофиль, который сохраняется в постоянных условиях гумификации органического субстрата. Распределение органического вещества по профилю исследуемой почвы резко убывающее. Максимальными запасами органического углерода обладала почва в вариантах: навоз 20 т/га в год и навоз 20 т/га + NPK, экв. 20 т/га навоза, где запасы ОВ в слое 0–20 см составили 36,7 и 39,8 т/га соответственно. Окультуривание почвы способствовало некоторому накоплению органического вещества в нижележащих горизонтах (табл. 3).

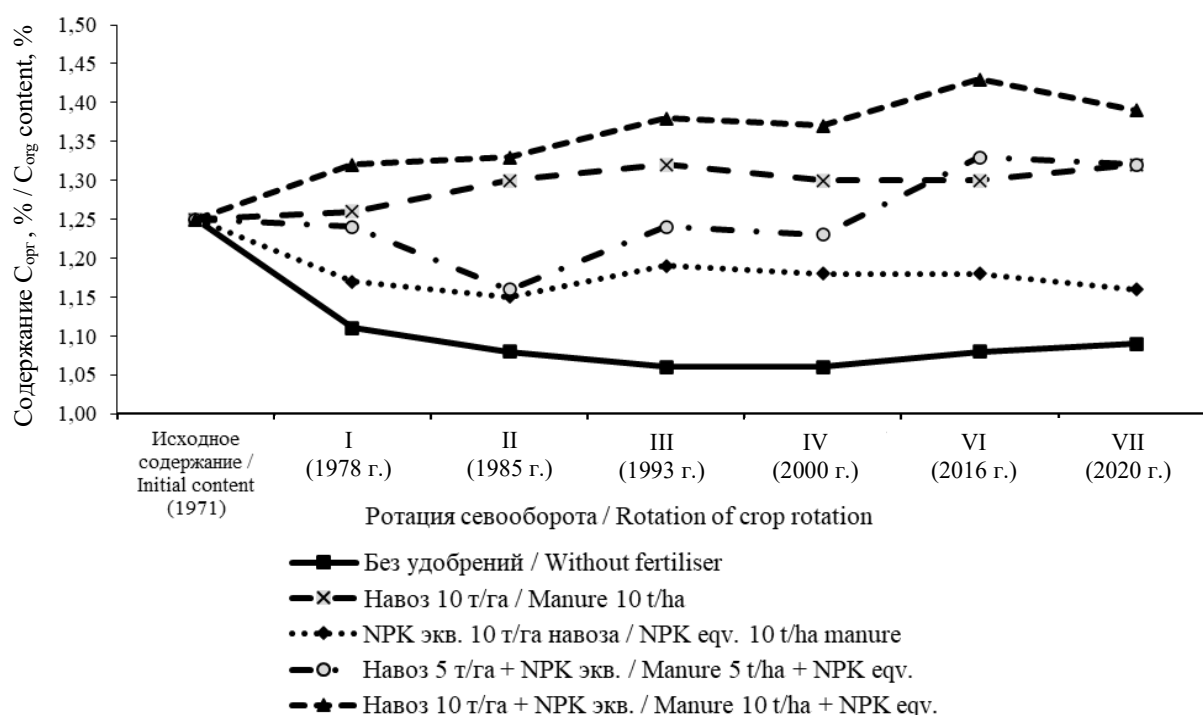


Рис. 2. Динамика органического углерода при длительном применении различных систем удобрения /
Fig. 2. Organic carbon dynamics at long-term application of various fertilizer systems

Таблица 3 – Изменение содержания C_{org} по профилю почвы при длительном применении органической, минеральной и органоминеральной системы удобрения (VI ротация севооборота) /
Table 3 – Change of C_{org} content by soil profile at long-term application of organic, mineral and organomineral fertilisation systems (VI rotation of crop rotation)

Вариант / Variant	Содержание, % / Content, %					Запасы, т/га / Reserve, t/ha		
	0–20 см	20–40 см	40–60 см	60–80 см	80–100 см	0–20 см	0–40 см	0–100 см
Без удобрений / Without fertilizer	1,15	0,58	0,38	0,36	0,34	29,9	45,3	75,1
Навоз 10 т/га / Manure 10 t/ha	1,33	0,72	0,33	0,22	0,22	34,6	53,8	78,4
Навоз 20 т/га / Manure 20 t/ha	1,41	0,81	0,39	0,20	0,20	36,7	58,2	81,6
НПК экв. 10 т/га навоза / NPK eqv. 10 t/ha manure	1,26	0,59	0,41	0,20	0,16	32,8	48,5	72,9
НПК экв. 20 т/га навоза / NPK eqv. 20 t/ha manure	1,31	0,61	0,39	0,35	0,41	34,1	44,5	85,8
Навоз 5 т/га + НПК экв. / Manure 5 t/ha + NPK eqv.	1,30	0,83	0,43	0,21	0,09	33,8	55,9	77,6
Навоз 10 т/га + НПК экв. / Manure 10 t/ha + NPK eqv.	1,38	0,84	0,36	0,24	0,29	35,9	58,2	86,4
Навоз 20 т/га + НПК экв. / Manure 20 t/ha + NPK eqv.	1,53	1,00	0,69	0,40	0,36	39,8	66,4	111,0
НСР ₀₅ / LSD ₀₅	0,15	0,12	0,21	$F_{\phi} < F_T$	$F_{\phi} < F_T$	4,8	7,6	10,8

Внесение удобрений привело к обогащению органического вещества активными (трансформируемыми) компонентами (табл. 4). Полученные расчетным методом значения $C_{транс}$ составляют от 0,31 до 0,61 % от массы почвы.

Доля потенциально минерализуемого органического углерода в составе общего пред-

ставлена на уровне 1,56–2,38 %, она минимальна в варианте без удобрений и максимальна в варианте навоз 5 т/га + экв. НПК. Максимальное содержание всех активных фракций органического вещества определено в варианте навоз 10 т/га + НПК экв. навозу, которое в 1,8–2,4 раза выше, чем в контрольном варианте.

Таблица 4 – Влияние системы удобрения на содержание активных фракций органического вещества дерново-подзолистой почвы (2019 г.) /

Table 4 – Influence of fertilization system on the content of active fractions of organic matter of sod-podzolic soil (2019)

Вариант / Variant	$C_{\text{общ}} / C_{\text{total}}$	$C_{\text{транс}} / C_{\text{trans}}$	$C_{0,1\text{NNaOH}}$	$C_{\text{лаб}} / C_{\text{lab}}$	$C_{\text{нм}} / C_{\text{pm}}$	$C_{\text{эв}} / C_{\text{hwe}}$
	%				мг/кг / mg/kg	
Без удобрений / Without fertilizer	1,09	0,31	0,23	0,11	170,4	60,0
Навоз 10 т/га / Manure 10 t/ha	1,32	0,54	0,34	0,22	289,6	70,0
NPK экв. 10 т/га навоза / NPK eqv. 10 t/ha manure	1,26	0,48	0,34	0,20	280,3	80,0
Навоз 5 т/га + NPK экв. / Manure 5 t/ha + NPK eqv.	1,30	0,52	0,35	0,21	314,5	90,0
Навоз 10 т/га + NPK экв. / Manure 10 t/ha + NPK eqv	1,39	0,61	0,47	0,26	317,0	110,0
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	0,15	—	0,03	0,02	27,3	0,02

Органическое вещество дерново-подзолистой почвы при минеральной системе удобрения. Анализ имеющихся экспериментальных данных по содержанию $C_{\text{орг}}$ под культурами севооборота в опыте с минеральной системой удобрения позволил выявить динамику этого показателя в зависимости от дозы полного

минерального удобрения (табл. 5). Интенсивное падение содержания органического углерода зафиксировано в контроле, убыль по годам варьировала в интервале 11–19 % от исходного. Темпы минерализации органического вещества замедлились при внесении минеральных удобрений в дозе 60 д. в./га.

Таблица 5 – Влияние доз минеральных удобрений на динамику органического углерода дерново-подзолистой почвы под культурами V ротации севооборота, % [25] /

Table 5 – Influence of mineral fertilizer doses on dynamics of organic carbon of sod-podzolic soil under crops of V rotation of crop rotation, % [25]

Вариант / Variant	Озимая рожь / Winter rye	Картофель / Potato	Яровая пшеница / Spring wheat	Клевер 1 г. н. / Clover 1 u.y.	Клевер 2 г. н. / Clover 2 u.y.	Ячмень / Barley	Овес / Oats
Без удобрений / Without fertilizer	1,03	1,08	1,00	1,09	1,00	1,04	1,04
N ₃₀ P ₃₀ K ₃₀	1,10	1,07	0,96	1,10	1,05	1,06	1,06
N ₆₀ P ₆₀ K ₆₀	1,15	1,13	1,08	1,13	1,17	1,14	1,19
N ₉₀ P ₉₀ K ₉₀	1,18	1,19	1,10	1,18	1,20	1,18	1,25
N ₁₂₀ P ₁₂₀ K ₁₂₀	1,27	1,26	1,18	1,25	1,25	1,18	1,24
N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀	1,28	1,38	1,19	1,23	1,28	1,19	1,25
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	0,06	0,04	0,05	0,05	0,06	0,05	0,08

Существенного изменения по содержанию углерода в почве в пятой ротации севооборота не наблюдали, по-видимому, в почве изучаемых вариантов после длительного применения возрастающих доз NPK установились стационарные уровни разные по величине. Минимальный – в почве контрольного варианта, максимальный – в варианте NPK 150 кг д. в./га. Сохранение исходного содержания $C_{\text{орг}}$ в почве (1,19–1,28 %, HCP₀₅ = 0,06) наблюдали в вариантах с внесением минеральных удобрений под зерновые культуры севооборота в дозах NPK по 60-90-120-150 кг/га д. в. Очевидно небольшие тренды содержания $C_{\text{орг}}$ по годам обусловлены различным количеством пожнивно-

корневых остатков, поступающих в почву, а также наличием аналитической ошибки, пространственной вариабельностью и сезонной составляющей.

Внесение в почву возрастающих доз полного минерального удобрения привело к увеличению подвижного углерода, извлекаемого из почвы 0,1 М раствором щелочи, с 0,21–0,28 в контрольном варианте до 0,28–0,43 % к массе почвы в варианте N₁₅₀P₁₅₀K₁₅₀ (табл. 6). Доля подвижного органического вещества к общему углероду почвы составляет 21–24 %, что характерно для дерново-подзолистых почв. На накопление подвижного органического углерода в исследуемой почве оказала влияние

величина актуальной кислотности, между значениями pH_{KCl} и концентрацией углерода

в щелочной вытяжке установлена обратная зависимость – $r = -0,87$.

Таблица 6 – Влияние возрастающих доз минеральных удобрений на динамику содержания активных компонентов в составе органического вещества /

Table 6 – The effect of increasing doses of mineral fertilizers on the dynamics of the content of active components in the composition of organic matter

Вариант / Variant	$C_{эв}, \text{мг/кг} / C_{hve}, \text{mg/kg}$				$C_{0,1n \text{ NaOH}}, \%$				$C_{0,1M \text{ Na}_4\text{P}_2\text{O}_7}, \%$			
	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2018 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2018 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2018 г.
Без удобрений / Without fertilizer	106	98	168	114	0,20	0,21	0,28	0,21	0,13	0,15	0,20	0,20
$N_{30}P_{30}K_{30}$	86	108	200	123	0,25	0,16	0,26	0,16	0,15	0,14	0,28	0,18
$N_{60}P_{60}K_{60}$	106	158	243	117	0,37	0,23	0,26	0,23	0,15	0,18	0,32	0,19
$N_{90}P_{90}K_{90}$	160	204	274	123	0,41	0,24	0,31	0,25	0,19	0,18	0,35	0,19
$N_{120}P_{120}K_{120}$	119	130	293	97	0,42	0,26	0,34	0,22	0,20	0,19	0,41	0,18
$N_{150}P_{150}K_{150}$	186	120	305	105	0,43	0,28	0,37	0,27	0,23	0,20	0,37	0,21
HCP ₀₅ / LSD ₀₅	15	20	20	24	0,04	0,04	0,03	0,07	0,03	0,04	0,04	0,06

Содержание лабильного углерода, извлекаемого в 0,1 М растворе пирофосфата натрия, варьировало от 0,13–0,20 до 0,20–0,37 % к массе почвы. Доля лабильного органического вещества в составе общего углерода составляет 14,6–16,8 %. Максимальное содержание углерода водной вытяжки было определено в почве севооборотного поля после уборки клевера 1-го года пользования – 168–105 мг/кг.

Методом корреляционно-регрессионного анализа выявлена связь урожайности картофеля с содержанием подвижного углерода в почве – $r = 0,72$ –0,96. Корреляционная зависимость между содержанием $C_{эв}$, $C_{0,1n \text{ NaOH}}$, $C_{0,1 \text{ M Na}_4\text{P}_2\text{O}_7}$ и урожайностью пшеницы – $r = 0,75$; 0,60 и 0,71 соответственно. Между урожайностью клевера 1-го года пользования с содержанием углерода в водной, щелочной и пирофосфатной вытяжках установлена корреляционная зависимость средней силы – $r = 0,41$; 0,30; 0,63 соответственно. Внесение NPK в возрастающих дозах способствовало накоплению активных компонентов в составе органического вещества.

Исследование элементного состава и молекулярной структуры гуминовых кислот дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы. По доминирующей парадигме второй половины XX века считалось, что преобладающая часть почвенного органического вещества (ПОВ) представлена гуминовыми веществами – высокомолекулярными, обогащенными гетероциклическим азотом, стабильными полимерами с ароматическим ядром и обширной алифатической периферией, которые и придают ПОВ многообразие и специфичность его

свойств и функций, а соотношение углерода гуминовых и фульвокислот ($C_{гк}:C_{фк}$) отражает качество ПОВ [26]. Эти представления противоречат современным исследованиям, проведенным российскими и зарубежными учеными в начале XXI века. Новую информацию о природе образования, составе и строении гуминовых веществ дают инструментальные методы анализа (инфракрасная Фурье-спектроскопия, масс-спектрометрия, ядерно-магнитный резонанс, рентгеноструктурный анализ, электронное микрофотографирование и др.) [27, 28].

Органическое вещество почвы подвергается непрерывному разрушению, создавая континуум более или менее разложившихся материалов разного размера, состава и структуры [29]. В настоящее время предложена трехслойная модель ПОВ. Ученые пришли к выводу, что гуминовые вещества и гуминовые кислоты в частности не являются гетерополимерами, а представляют собой «супрамолекулярные ассоциации самособирающихся гетерогенных и относительно небольших молекул, образующихся в результате деградации и разложения мертвого биологического материала». Формирование супрамолекулярных агрегатов обеспечивается невалентными взаимодействиями (ароматические π - π и гидрофобные взаимодействия, силы Ван-дер-Ваальса, электростатические и водородные связи) [29, 30, 31]. Многослойная модель гораздо лучше объясняет присущие почвенному органическому веществу (ПОВ) стабильность и доступность к биodeградации, чем полимерная концепция.

Основным критерием определения гуминовых веществ, по мнению Международного общества по гуминовым веществам (IHSS) и Американского общества почвоведов, на сегодняшний день по-прежнему является растворимость в щелочах [29]. Разная растворимость гуминовых веществ в кислотно-щелочных средах положена в основу их деления на гуминовые кислоты, фульвокислоты и неэкстрагируемый остаток (гумин).

Среди гуминовых веществ особое значение имеют гуминовые кислоты (ГК), так как они проявляют высокую функциональную активность, определяют специфику водных, физических, химических и тепловых свойств почвы. Их состав и структура зависят от условий почвообразования и изменяются при антропогенном воздействии на почву.

Для получения информации о строении супрамолекулярных агрегатов гуминовых кислот, наличии основных конституционных элементов в их структурных фрагментах и направлении трансформации органического вещества под действием природных и антропогенных факторов нами использован метод элементного анализа. Посредством определения элементного состава дается оценка особенностей органического вещества типов, подтипов, разновидностей почв (включая культурные

варианты). Исходным и априорным основанием для такого рода оценок служит соответствие состава гумусовых кислот условиям почвообразования.

Соотношения основных конституционных элементов характеризуют направление процессов трансформации гуминовых кислот при антропогенном воздействии на почву. Соотношение Н:С определяет степень обогащенности структуры ГК ароматическими фрагментами, О:С – степень окисленности, С:N – отражает роль азотсодержащих компонентов в построении гуминовых кислот [26].

Данные элементного анализа ГК целинной дерново-подзолистой почвы под лесом и лугом свидетельствуют о том, что в условиях промывного режима, пониженного содержания обменных оснований из обогащенных целлюлозо-лигнинным комплексом растительных остатков с низким содержанием азота формируются гуминовые кислоты с пониженным содержанием углерода и азота в составе агрегатов ГК. Низкая микробиологическая активность приводит к уменьшению скорости минерализации органического материала – растительных остатков, что приводит к возрастанию доли алифатических группировок, соотношение Н:С составляет 1,43–1,56 (табл. 7).

Таблица 7 – Элементный состав гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы в длительном опыте в зависимости от приёмов земледелия /

Table 7 – Elemental composition of humic acids of sod-podzolic soil in long-term experiment depending on land use practices

Вариант / Variant	Содержание, % / Content, %				Атомные соотношения / Atomic rating			Степень окисленности / Oxidation level
	C	H	O	N	H / C	O / C	C / N	
Бесменный чистый пар / Continuous «black» fallow	<u>35,21</u> 32,41	<u>4,19</u> 46,35	<u>27,07</u> 18,71	<u>2,96</u> 2,33	1,43	0,58	13,91	-0,28
Бесменный ячмень / Continuous barley	<u>35,59</u> 33,39	<u>3,79</u> 42,65	<u>30,32</u> 21,34	<u>3,06</u> 2,43	1,28	0,64	13,74	-0,001
Зерновой севооборот / Grain crop rotation	<u>31,73</u> 33,41	<u>3,18</u> 40,21	<u>30,37</u> 24,00	<u>2,49</u> 2,25	1,20	0,72	14,85	0,23
Типичный севооборот с унавоженным паром / Typical crop rotation with manured «black» fallow	<u>35,75</u> 32,83	<u>4,07</u> 44,85	<u>28,83</u> 19,88	<u>2,84</u> 2,24	1,37	0,61	14,66	-0,16
Севооборот с высоким насыщением бобовыми (43 %) / Crop rotation with high legume saturation (43 %)	<u>25,96</u> 28,36	<u>3,61</u> 47,41	<u>26,68</u> 21,89	<u>2,24</u> 2,10	1,67	0,77	13,50	0,13
Залежь (злаково-разнотравный луг) / Neglected field (grass-forb meadow)	<u>25,49</u> 29,50	<u>2,89</u> 40,10	<u>32,14</u> 27,93	<u>2,32</u> 2,31	1,36	0,95	12,77	0,53

Примечание: числитель – массовая доля; знаменатель – атомная доля (все расчеты приведены на обеззоленные препараты) /

Note: numerator – mass fraction; denominator – atomic fraction (all calculations are for deashed preparations)

Проведенные исследования показали, что гуминовые кислоты, выделенные препаративно из пахотной почвы длительного стационарного опыта и ее целинных аналогов, по содержанию конституционных элементов (C, H, N, O) соответствуют средним показателям для класса гуминовых кислот дерново-подзолистых почв.

Преобладание процессов минерализации органического вещества над накоплением гуминовых веществ отмечено в почве зернового севооборота и под бессменным ячменем. В этих условиях при деструкции органического материала наиболее быстро отщепляются алифатические группировки и остаются ароматические структурные фрагменты с более высоким содержанием углерода. В этих вариантах выявлено более низкое соотношение H:C, которое составляет 1,20–1,28 и свидетельствует о повышении доли ароматических структур в гуминовых кислотах при истощении почвы углеродом и элементами питания. Высокая степень окисленности ($W = 0,23$) ГК зернового севооборота указывает на глубину гумификации органического вещества [32]. Наиболее широкое соотношение C:N, равное 16,2, выявлено в ГК почвы зернового севооборота и показывает, что они обеднены азотом, так как формируются из бедных азотом растительных остатков зерновых культур [33].

ГК залежной почвы характеризуются минимальным содержанием водорода, максимальным – кислорода. Соотношение O:C гуминовых кислот рассматриваемых вариантов опыта возрастает с уменьшением антропогенной нагрузки на почву и максимально в ГК залежи – 0,95. Окисленность гуминовых кислот (W) варьирует в зависимости от типа землепользования в интервале от -0,26 до +0,53. Максимальное содержание кислородсодержащих групп определено в составе ГК залежной почвы. Высокая степень окисленности ГК с положительным знаком – свидетельство наиболее благоприятных условий гумификации органического вещества в почве залежи [33, 34].

Инфракрасная спектроскопия является обязательным и важнейшим диагностическим методом исследования гумусовых веществ. Метод позволяет идентифицировать атомные группировки, дает информацию о типе связей и элементах структуры молекул гуминовых кислот [34, 35, 36]. Совокупность и интенсивность полос поглощения позволяют судить

о роли ароматических и алифатических фрагментов в структуре ГК. ИК-спектры используются как характерный диагностический признак гуминовых кислот и позволяют выявить некоторые особенности, связанные с условиями их образования.

Гуминовые кислоты, выделенные из почвы различных вариантов длительного опыта, имели однотипные ИК-спектры. Для примера представлены спектры почвы злаково-разнотравного луга и зернового севооборота (рис. 3, 4). По наличию полос поглощения в области 1718–1719 (колебания группы C=O карбоновых кислот) и 1632–1647 см^{-1} (валентные колебания сопряженных двойных связей) можно предположить, что в супрамолекулярных агрегатах присутствуют ароматические структуры, которые более интенсивно выражены в спектрах гуминовых кислот почвы зернового севооборота. Агрегаты гуминовых кислот почвы злаково-разнотравного луга имели более разветвленную структуру, по-видимому, состоят из большего количества индивидуальных мономеров различной молекулярной массы с большим количеством алифатических группировок. Это подтверждается интенсивным поглощением в области 2929–2849 и 1400–1470 см^{-1} , вызванным валентными колебаниями, метильных и метиленовых группировок [37].

Сходство ГК пахотных и целинных почв обусловлено практически одинаковым набором факторов образования: почва, растения, влага, тепло, микроорганизмы; различия – качественным составом поступающего в почву органического материала и его количеством, интенсивностью антропогенного воздействия и случайностью сочетания факторов.

Экофизиологические показатели микробно-ценозов дерново-подзолистой почвы Предуралья. При окультуривании целинные дерново-подзолистые почвы утрачивают специфические черты естественных микробных сообществ. Смена естественной растительности культурной, обогащение почв минеральными элементами и доступными органическими соединениями резко изменяют условия обитания микроорганизмов. Состояние микробного сообщества почвы зависит от используемых агротехнических приемов (применения удобрения, возделывания почвозащитных культур, вида севооборота, техники заделки растительных остатков) [38, 39, 40].

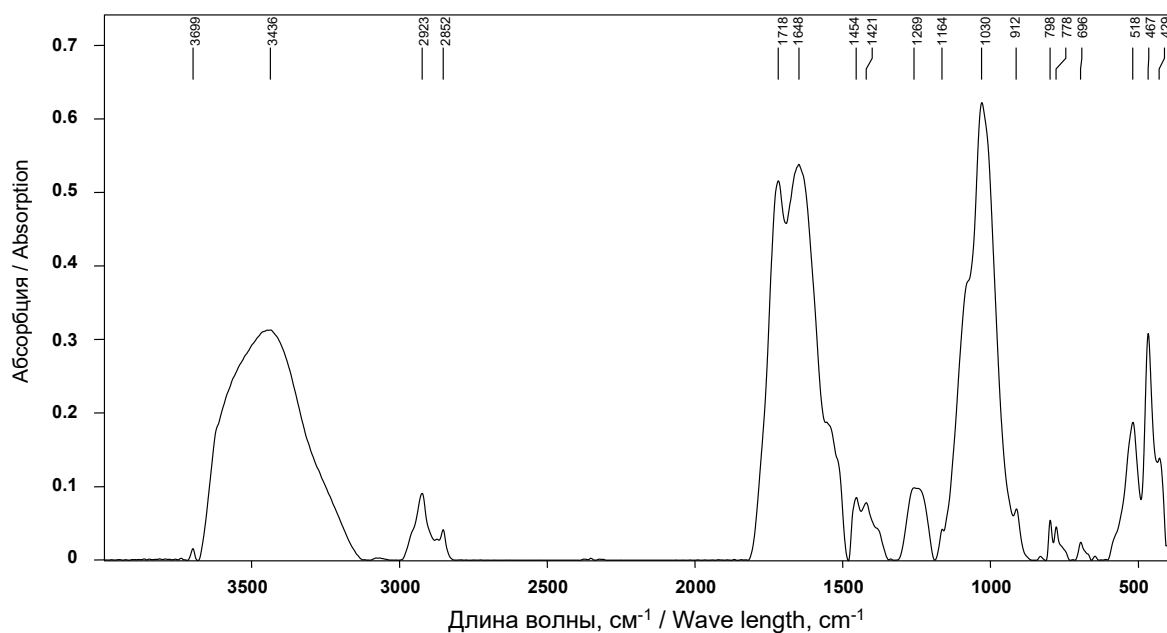


Рис. 3. Инфракрасный спектр гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы под разнотравно-злаковым лугом /

Fig. 3. Infrared spectrum of humic acids of sod-podzolic soil under grass-forb meadow

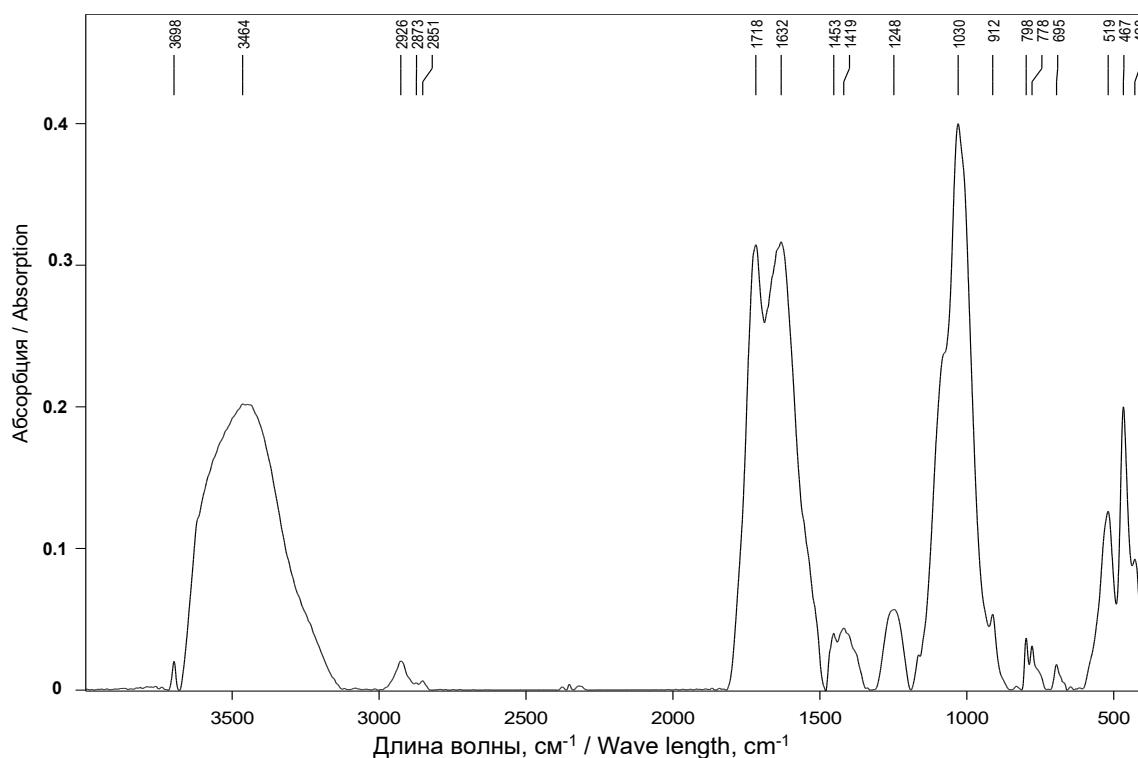


Рис. 4. Инфракрасный спектр гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы в зерновом севообороте (бобовых культур – 0 %) /

Fig. 4. Infrared spectrum of humic acids of sod-podzolic soil in grain crop rotation (legume crops – 0 %)

Общую закономерность влияния агротехнологий на почвенные микроорганизмы отражает показатель продуцирования ими углекислого газа [39]. По динамике и скорости

продуцирования углекислоты можно судить не только о напряженности биологических процессов, но и оценить потери органического вещества вследствие развития процессов

минерализации. Микробная биомасса считается наиболее лабильным компонентом органического вещества, в первую очередь реагирующим на изменения окружающей среды и отражающим тренд накопления или минерализации органического вещества почвы [40]. Почвы разных климатических зон различаются не только по содержанию микробной биомассы, но и по ее чувствительности к природным и антропогенным воздействиям. В дерново-подзолистой почве изменения содержания микробной биомассы на 59 % определялись влиянием антропогенных факторов и лишь на 14 % – сезонными колебаниями, тогда как в выщелоченном черноземе вклад этих факторов равнялся 5 и 66 % соответственно. Микробная биомасса, ее активность и разнообразие микробного сообщества широко используются в международных мониторинговых исследованиях [41] и в качестве индикаторов устойчивости почв к внешним воздействиям. По данным [42], в пахотных почвах содержание микробной биомассы значительно ниже, чем под лесом и залежью. Доля микробного углерода в общем углероде почвы варьирует от 1 до 15 %.

Важный процесс, характеризующий интенсивность протекающих биологических процессов в почве – азотфиксация. Азот – биогенный элемент, изменения и превращения которого в почве напрямую связаны с органи-

ческим веществом и микробиологической активностью почвы [43]. В агроэкосистемах биогеохимический цикл азота сильно нарушен из-за регулярных обработок почвы, внесения удобрений, применения севооборотов разных типов и выноса значительного количества азота с урожаем. Важнейшим источником поступления азота в почву служит биологический, фиксируемый микроорганизмами азот атмосферы, составляющий более половины общего количества этого элемента, поступающего в почву. Ацетиленовый метод показывает, что 70–80 % культур бактерий, выделяемых из почвы на питательные среды, фиксирует азот. Способность азотфиксаторов активно размножаться в почве и проявлять свои многогранные качества весьма ограничена из-за дефицита легкодоступных органических веществ в почве и высокой требовательности микроорганизмов к условиям среды обитания.

Изучены показатели микробиологической активности целинной и пахотной дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы Среднего Предуралья [44]. В почве под смешанным лесом установлено наибольшее содержание углерода микробной биомассы (1236 мкг/г), максимальная скорость продуцирования CO_2 (3,13 мкг C- CO_2 /г час) и азотфиксация (77,18 мкг C_2H_4 /кг час) (табл. 8).

Таблица 8 – Экофизиологические показатели состояния микробного сообщества дерново-подзолистой почвы (слой 0–20 см) [44] /

Table 8 – Ecophysiological indicators of the microbial community of sod-podzolic soil (0–20 cm layer) [44]

Вариант / Variant	БД / BR, $\mu\text{g C-CO}_2/\text{g hour}$	СИД / SIR, $\mu\text{g C-CO}_2/\text{g hour}$	$C_{\text{мик}}$, мкг/г / C_{mic} , $\mu\text{g/g}$	$q\text{CO}_2$ $\mu\text{g CO}_2\text{-C}/\text{mg C}_{\text{mic}} \text{ hour}$	$C_{\text{мик}}/C_{\text{орг}}$, % / $C_{\text{mic}}/C_{\text{org}}$, %	$C_{\text{мик}}/C_{\text{лаб}}$ $\text{Na}_2\text{P}_2\text{O}_7$, % / $C_{\text{mic}}/C_{\text{lab}}$	Азотфиксация / Nitrogen fixation, $\mu\text{g C}_2\text{H}_4/\text{kg hour}$
Бессменный чистый пар / Continuous «black» fallow	1,62±0,56	9,1±2,2	366±88	4,4	4,7	21,5	11,53±2,38
Бессменный ячмень / Continuous barley	2,02±0,36	10,3±1,03	413±42	4,9	3,8	19,7	15,54±1,74
Козлятник восточный (бессменно) / Eastern galega (continuous)	2,75±0,34	29,5±5,57	1182±223	2,3	8,2	42,2	47,60±15,85
Полевой восьмипольный севооборот / Eight-field crop rotation	2,86±0,28	13,8±2,54	554±102	5,2	5,3	21,3	32,1±3,87
Злаково-разнотравный луг / Grass-forb meadow	2,77±0,35	14,3±1,47	571±59	4,8	4,6	28,6	62,14±11,38
Смешанный лес / Mixed forest	3,13±0,30	30,9±3,42	1236±137	2,5	4,6	21,7	77,18±22,96

Примечания: БД – базальное дыхание; СИД – субстрат-индуцированное дыхание; $q\text{CO}_2$ – удельное дыхание микробной биомассы в почве (микробный метаболический коэффициент); $C_{\text{мик}}/C_{\text{орг}}$ – доля углерода микробной биомассы ($C_{\text{мик}}$) в органическом углероде ($C_{\text{орг}}$) почвы /

Notes: BR – basal respiration; SIR – substrate-induced respiration; $q\text{CO}_2$ – specific respiration of microbial biomass in the soil (microbial metabolic quotient); $C_{\text{мик}}/C_{\text{орг}}$ – carbon content of microbial biomass ($C_{\text{мик}}$) in organic carbon ($C_{\text{орг}}$) of the soil

Отмечено низкое удельное дыхание микробной биомассы в почве – 2,5 мкг С-СО₂/мг С_{мик} час, что свидетельствует об устойчивости и стабильности данной экосистемы. Многолетнее (40 лет) парование дерново-подзолистой почвы (интенсивная механическая обработка и отсутствие поступления растительных остатков) обусловило минимальное содержание органического вещества, микробной биомассы, минимальное базальное дыхание (БД) и азотфиксацию (в 1,9–6,7 раза меньше, чем под лесом).

При бессменном выращивании ячменя и возделывании полевых культур в севообороте поступление в почву растительных остатков (даже в незначительном количестве) замедлило скорость минерализации органического вещества и соответственно увеличило содержание С_{мик} и микробную дыхательную активность. Количество общего органического углерода, микробная биомасса, скорость продуцирования СО₂ по сравнению с бессменным паром возросли в 1,1–1,7 раза. Лучшие условия функционирования и более слабую степень нарушения устойчивости микробного сообщества среди рассматриваемых пахотных почв наблюдали при длительном возделывании многолетней бобовой культуры – козлятника восточного. Содержание органического вещества, углерода микробной биомассы и метаболический микробный коэффициент под козлятником соответствовали почве лесной экосистемы. Показано, что количество и качество органического субстрата, поступающего в почву при ее различном землепользовании, определяет содержание микробной биомассы и базальное дыхание. Установлена высокая корреляционная зависимость углерода микробной биомассы, базального дыхания с общим содержанием органического углерода ($r = 0,81–0,90$), а также высокая и средняя зависимость с его лабильной фракцией ($r = 0,67–0,79$).

Таким образом, среди пахотных почв более стабильное функционирование микробного сообщества наблюдали при длительном (более 30 лет) возделывании многолетней бобовой культуры – козлятника восточного, где содержание углерода микробной биомассы и удельное микробное дыхание соответствовали почве лесной экосистемы.

Новый импульс в изучении органического вещества почвы. В связи с проблемой глобального изменения климата повышенное внимание

уделяется оценке возможной секвестрации углерода, увеличению углеродсеквестрирующей способности агроценозов [16, 45, 46]. Под почвенной секвестрацией углерода понимается перевод атмосферного углекислого газа в живое органическое вещество растений (фотосинтез) с последующей трансформацией мортмассы в почвенное органическое вещество и его долговременное хранение в почвенном резервуаре с минимальным риском немедленного возврата в атмосферу [47, 48, 49].

Сельскохозяйственное производство является одним из источников парниковых газов, меняющих климат на планете. В то же время сельское хозяйство может применять технологии, обеспечивающие уменьшение поступления парниковых газов из атмосферы при внедрении регенеративного (восстановительного) сельского хозяйства за счет методов, обеспечивающих восстановление почв в процессе использования.

Стратегическая цель эффективного использования земель сельскохозяйственного назначения – накопление и сохранение органического вещества в почве. Для этого необходимо создание определенных условий землепользования: минимальная обработка почвы, внесение высоких доз органических удобрений, увеличение количества и улучшение качества биомассы, поступающей в почву, возделывание сельскохозяйственных культур и сортов, активно секвестрирующих углерод атмосферы, использование генетических ресурсов микроорганизмов, стимулирующих рост и развитие растений, и другие агротехнические приемы.

Основными резервуарами-накопителями углерода, которые влияют на природные потоки СО₂ и его концентрацию в атмосфере, являются наземная растительная биомасса и почвенное органическое вещество. Углеродный баланс экосистем – это интегральный показатель их функционирования, он отражает интенсивность основных процессов, происходящих в живых системах: фотосинтеза и дыхания. Особо необходимо регулировать потерю или накопление органического вещества в пахотных почвах агроценозов, которые являются основным и долговременным резервуаром для стока углерода. Любые изменения в системе землепользования неизбежно приводят к изменениям запасов органического вещества.

Считается, что закрепиться в почве может лишь столько С_{орг}, сколько позволяют физико-

химические свойства почвы. Вследствие этого реальные размеры секвестрации возможны только до определенного уровня, соответствующего порогу насыщения почвы органическим углеродом, выше которого поступление свежего органического вещества не приводит к дополнительному накоплению $C_{орг}$ [50]. Гранулометрический состав дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почв указывает на высокий потенциал для насыщения их углеродом. Процесс образования устойчивых органоминеральных комплексов, вероятно, лимитируется биоклиматическим потенциалом конкретной зоны. Количество стабилизированного органического вещества в почве характеризует углеродпротекторную емкость почвы (углероддепонирующий потенциал почвы (СРС).

Исследования ведущих российских и зарубежных ученых показали, что способность почв стабилизировать и сохранять CO_2 атмосферы контролируется содержанием тонкодисперсных гранулометрических фракций пыли и глины размером $<0,05$ (0,02) мм. Чем больше насыщенность этих фракций органическим углеродом, тем меньше углеродсеквестрирующий потенциал почвы.

Средняя величина углеродпротекторной емкости исследуемой почвы варьирует от 26,1 до 32,9 г С/кг в слое почвы 0–20 см и практически не зависит от приемов ее использования (табл. 9) [21]. Если рассчитывать углеродпротекторную емкость пахотной почвы в т/га, то СРС исследуемой почвы составит 75,8–82,3 т/га органического углерода в слое 0–20 см. Исследуемая пахотная почва насыщена углеродом от 25,95 % (бессменный чистый пар) и до 50,4 % (севооборот восьмипольный, $N_{150}P_{150}K_{150}$). Следовательно, у пахотной дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы Среднего Предуралья высокий потенциал для секвестрации атмосферного углерода, его накопления и депонирования в почве. Значимыми факторами, оказывающими влияние на содержание органического углерода, являются количество и качественный состав биомассы, поступающей в почву агроценозов.

Нами установлено, что естественная дерново-подзолистая почва находится в устойчивом состоянии, процессы минерализации и гумусообразования под лесной растительностью уравновешены. Накопления органического углерода в течение 30 лет исследо-

ваний не наблюдали, сколько поступает органического вещества с растительными остатками, столько и минерализуется.

Содержание $C_{орг}$ в почве под лесом составляет $3,45 \pm 0,02$ %, запасы – 52,8 т С/га соответственно. В почве под лесом установилось динамическое равновесие между минерализацией и накоплением органического вещества. Содержание органического углерода находится на стационарном уровне и не меняется за годы наблюдения. Расчетным путем установлено, что насыщенность верхнего органического горизонта без учета лесной подстилки составляет 39,9 т С/га (слой 3–20 см, $d = 0,9$ г/см³), экспериментально определено 52,8 т/га. Следовательно, целинная почва под лесом полностью насыщена углеродом.

Применение различных систем удобрения неизбежно приводит к изменениям запасов органического вещества, таким образом, его потерю или накопление в пахотных почвах можно регулировать. Анализ динамики содержания и запасов органического углерода в стационарных полевых опытах Пермского НИИСХ в зависимости от длительности использования почвы и применяемых агротехнологий показал, что наибольшие изменения происходят в первые 1–2 ротации севооборота или первые 10–12 лет землепользования. Далее в почве устанавливается новое квазистационарное состояние – уравнированность процессов минерализации и гумусообразования.

Интенсивная обработка почвы инициировала значительные потери почвенного углерода (см. рис. 1). За годы наблюдений в беспахотной почве в слое 0–20 см запасы органического углерода уменьшились на 8,3 т/га. Использование атмосферного углекислого газа на процесс фотосинтеза растениями в почве чистого бессменного пара приближается к нулю, однако в небольших количествах оно существует за счет сорной растительности.

В севообороте с минеральной системой удобрения почвы в контрольном варианте за 30 лет ведения опыта запасы углерода в пахотном слое почвы (0–20 см) сократились на 5,5 т/га (табл. 10). В этом варианте процесс минерализации органического вещества в почве преобладает над его накоплением. Общее количество С- CO_2 атмосферы, преобразованного в фитомассу, с учетом основной продукции (зерно), посевами овса составляет около 5,37 т/га в год.

Таблица 9 – Углеродпротекторная емкость (CPC) дерново-подзолистой почвы, слой 0–20 см [21] /
Table 9 – Carbon protective capacity (CPC) of sod-podzolic soil, layer 0–20 cm [21]

Вариант / Variant	Содержание, % от массы почвы / Content, % of soil mass		Углеродпротекторная емкость почвы, г C/kg почвы / Carbon protective capacity of soil, g C/kg of soil			
	сумма частиц <0,02 мм / sum of particles <0.02 mm	сумма частиц <0,05 мм / sum of particles <0.05 mm	CPC ₁ (<0,02 мм) (<0.02 mm)	CPC ₂ (<0,02 мм 2:1) (<0.02 mm 2:1)	CPC ₄ (<0,05 мм 2:1) (<0.05 mm 2:1)	CPC среднее / CPC average
Бесенный чистый пар / Continuous «black» fallow	66,7	74,3	28,8	31,2	30,4	30,1
Полевой восьмипольный севооборот (вариант без удобрений) / Eight-field crop rotation (variant without fertilizer)	70,8	79,2	30,3	32,9	31,4	31,5
Полевой восьмипольный севооборот (вариант N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀) / Eight-field crop rotation (variant N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀)	74,5	84,8	31,7	34,4	32,6	32,9
Козлятник восточный 1988 г. посева (бесенно) / Eastern galega 1988 sowing (continuous)	65,4	72,4	28,3	30,7	30,0	29,7
Злаково-разнотравный луг / Grass-forb meadow	64,9	71,2	28,1	30,5	29,7	29,4
Смешанный лес / Mixed forest	55,3	59,0	24,6	26,5	27,2	26,1

Примечания: CPC₁, CPC₂ – углеродпротекторная емкость почвы, г C/kg, рассчитанная по уравнениям, представленным в работе [50] с учетом содержания в почве гранулометрических частиц размером <0,02 мм; CPC₄ углеродпротекторная емкость почвы, г C/kg, рассчитанная по уравнению, представленному в работе [51] с учетом содержания в почве гранулометрических частиц размером <0,05 мм; соотношение 2:1 означает преобладание в минеральном составе почвы глины.

Notes: CPC₁, CPC₂ – carbon protective capacity of soil, g C/kg, calculated by the equations presented in [50] taking into account the content of granulometric particles <0.02 mm in the soil; CPC₄ – carbon protective capacity of soil, g C/kg, calculated by the equation presented in [51] taking into account the content of granulometric particles <0.05 mm in the soil; the ratio 2:1 means the predominance of clay in the mineral composition of soil.

Таблица 10 – Количество и качество биомассы, поступающей в почву в различных фитоценозах /
Table 10 – Quantity and quality of biomass entering the soil in different phytocenoses

Объект исследования / Object of research	Основная продукция / Main product				Побочная продукция (солома) / By-product (straw)				Пожнивно-корневые остатки / Subble and root residues			
	кол-во, м/га / quantity, t/ha	C	N, %	C / N	кол-во, м/га / quantity, t/ha	C	N, %	C / N	кол-во, м/га / quantity, t/ha	C	N, %	C / N
Лесная подстилка: мелкие ветки, листья хвойных и лиственных деревьев, трава / Forest litter: small branches, leaves of conifers and deciduous trees, grasses	6,0	45,6	2,7	2,0	22,4	-	-	-	-	-	-	-
Злаково-разнотравный луг (наземная биомасса + войлок) / Grass-forb meadow (aboveground biomass + felt)	2,3	44,1	1,0	1,8	24,2	-	-	-	3,8	36,7	1,4	40,3
Козлятник восточный 1988 г. посева (пожнивно-корневые остатки) / Eastern galega 1988 sowing (subble and root residues)	8,6	44,5	3,8	2,8	15,7	-	-	-	10,1	45,1	4,6	20,2
Полевой восьмипольный севооборот (вариант без удобрений), овес / Eight-field crop rotation (variant without fertilizer), oat	5,0	42,5	2,3	2,0	21,0	42,3	2,1	0,4	3,5	32,0	1,1	0,6
Полевой восьмипольный севооборот (вариант N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀), овес / Eight-field crop rotation (variant N ₁₅₀ P ₁₅₀ K ₁₅₀), oat	5,1	42,5	2,2	2,3	18,9	42,9	2,9	0,5	3,8	32,8	1,3	0,7

Длительное применение минеральных удобрений в дозе 150 кг д. в./га обеспечило равновесное состояние между поступлением $C_{орг}$ в почву и его минерализацией. С учетом основной продукции при выращивании овса в почву поступает около 6,3 т/га в год углерода, преобразованного из углекислого газа атмосферы в биомассу растений. В этом варианте количество поступающего в почву $C_{орг}$ ежегодно с побочной продукцией (соломой) и пожнивно-корневыми остатками поддерживает установившийся уровень органического вещества, и соответствует количеству минерализованного углерода в год.

В работе [52] представлены экспериментальные данные по накоплению и потерям органического углерода в севообороте за шесть ротаций длительного стационарного опыта. Установлено, что за вегетационный период в процессе фотосинтеза растения ячменя ярового связывают в органические соединения

2,8–3,3 т/га углерода из атмосферы (10,3–11,6 т/га CO_2) за вегетационный период, клевера лугового второго года пользования – 4,2–5,2 т С/га (15,1–18,6 т/га CO_2) в зависимости от вариантов опыта. За ротацию восьмипольного севооборота возделываемые культуры секвестрируют из атмосферы 82,3–99,3 т/га углекислого газа, или 22,4–27,1 т/га углерода в зависимости от системы удобрения почвы (табл. 11). Накопление органического углерода 5,0 т/га в слое 0–20 см относительно исходного содержания за шесть ротаций севооборота наблюдали при насыщении почвы навозом КРС 20 т/га, совместном применении навоза КРС 20 т/га и эквивалентного количества NPK. В этом варианте определено накопление органического углерода в слое 0–40 см на 11 т/га, в слое 0–100 см на 32 т/га больше, чем в варианте без удобрений, следовательно, углерод будет длительно храниться в глубинных слоях почвы, т. е. находиться на депонировании (рис. 5).

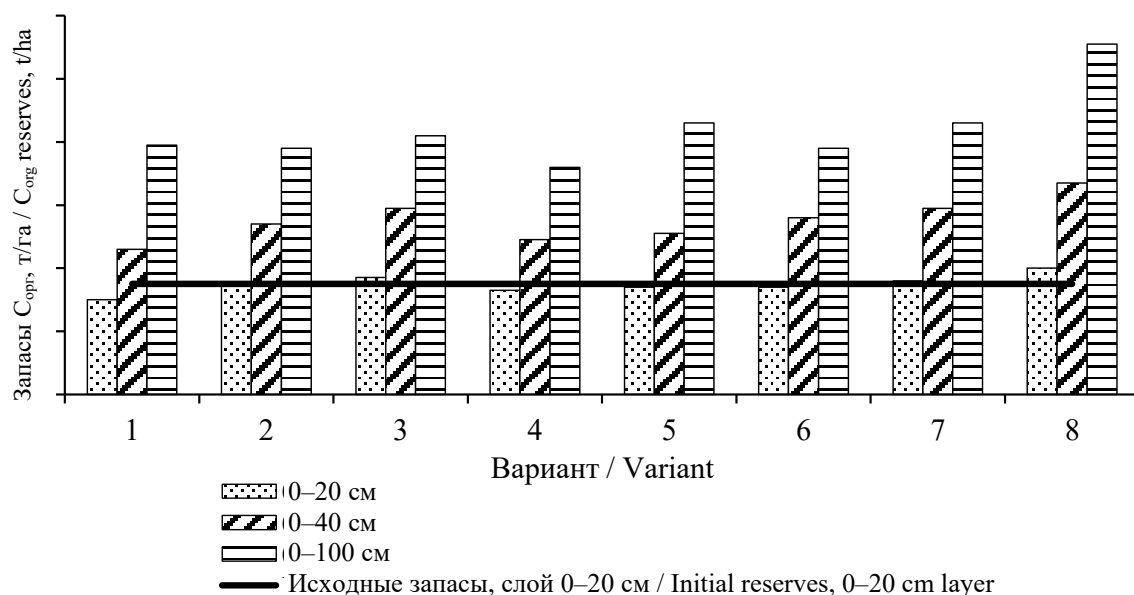


Рис. 5. Изменение запасов $C_{орг}$ в почве при длительном применении органической, минеральной и органоминеральной систем удобрения (VI ротация севооборота): 1 – без удобрений; 2 – навоз 10 т/га; 3 – навоз 20 т/га; 4 – NPK экв. 10 т/га навоза; 5 – NPK экв. 20 т/га навоза; 6 – навоз 5 т/га + NPK экв.; 7 – навоз 10 т/га + NPK экв.; 8 – навоз 20 т/га + NPK экв. /

Fig. 5. Change of $C_{орг}$ reserves in soil under long-term application of organic, mineral and organomineral fertilization systems (VI rotation of crop rotation): 1 – without fertilizer; 2 – manure 10 t/ha; 3 – manure 20 t/ha; 4 – NPK eqv. 10 t/ha manure; 5 – NPK eqv. 20 t/ha manure; 6 – manure 5 t/ha + NPK eqv.; 7 – manure 10 t/ha + NPK eqv.; 8 – manure 20 t/ha + NPK eqv.

Известно, что многолетние травы имеют не только кормовое значение, но и способствуют повышению плодородия почвы и увеличению урожая последующих за ними культур в севообороте. Количество органической био-

массы, поступающее в почву с корневыми и пожнивными остатками многолетних трав при благоприятных погодных условиях, в 3–5 раз превышает его количество, оставляемое однолетними культурами.

Таблица 11 – Секвестрация атмосферного углерода сельскохозяйственными культурами за шестую ротацию севооборота (среднее по двум полям)
 Table 11 – Sequestration of atmospheric carbon by crops for the sixth rotation of crop rotation (average for two fields)

Вариант / Variant	Урожайность / сбор урожая / Yield / carbon harvest	Рожь / Rye		Пшеница / Wheat		Клевер 1-го г.п. / Clover 1 year of use		Клевер 2-го г.п. / Clover 2 year of use		Ячмень / Barley		Картофель / Potatoes		Овёс / Oats		Общая сбор C / CO ₂ m/га / Total C / CO ₂ harvest, t/ha
		зерно / grain	солома + ПКО / straw + SRR	зерно / grain	солома + ПКО / straw + SRR	сено / hay	ПКО / + SRR	сено / hay	ПКО / + SRR	зерно / grain	солома + ПКО / straw + SRR	клубни / tubers	ботва + ПКО / Roughage + SRR	зерно / grain	солома + ПКО / straw + SRR	
Без удобрений / Without fertilizer	1	3,2	8,1	2,5	6,3	3,3	4,3	3,0	4,2	3,6	7,2	2,8	1,3	1,6	3,8	-
	2	1,3	3,3	1,1	2,6	1,4	1,7	1,3	1,7	1,5	3,0	1,2	0,5	0,7	1,3	22,4/82,3
Навоз 10 т/га / Manure 10 t/ha	1	3,8	9,1	2,8	6,7	3,2	4,2	3,0	4,2	3,8	7,4	3,2	1,5	1,6	4,1	-
	2	1,6	3,7	1,2	2,8	1,3	1,7	1,3	1,7	1,6	3,0	1,3	0,6	0,7	1,5	23,9/87,8
Навоз 20 т/га / Manure 20 t/ha	1	4,1	9,6	3,0	7,1	3,5	4,3	3,3	4,3	3,8	7,7	3,4	1,6	1,8	4,3	-
	2	1,7	3,9	1,3	2,9	1,5	1,8	1,4	1,7	1,6	3,2	1,4	0,7	0,8	1,6	25,3/92,7
NPK экв. 10 т/га навоза / NPK eqv. 10 t/ha manure	1	4,0	9,5	3,4	7,6	3,1	4,2	3,3	4,3	3,8	7,6	4,1	2,0	1,8	4,3	-
	2	1,7	3,8	1,4	3,1	1,3	1,7	1,4	1,7	1,6	3,1	1,7	0,8	0,8	1,6	25,7/94,3
NPK экв. 20 т/га навоза / NPK eqv. 20 t/ha manure	1	4,2	9,7	3,4	7,8	3,1	4,2	3,8	4,4	4,1	8,3	4,0	1,9	2,1	4,8	-
	2	1,8	3,9	1,4	3,2	1,3	1,7	1,6	1,8	1,7	3,4	1,6	0,8	0,9	1,7	26,6/98,5
Навоз 5 т/га + NPK экв. / Manure 5 t/ha + NPK eqv.	1	4,1	9,8	3,2	7,3	3,5	4,3	3,7	4,4	3,9	7,4	4,9	2,4	1,6	4,1	-
	2	1,7	3,9	1,4	3,0	1,5	1,8	1,5	1,8	1,6	3,1	2,0	1,0	0,7	1,5	26,4/96,7
Навоз 10 т/га + NPK экв. / Manure 10 t/ha + NPK eqv.	1	4,2	10,1	3,5	8,1	3,4	4,3	3,9	4,4	3,8	7,3	4,3	2,0	1,9	4,4	-
	2	1,8	4,1	1,5	3,3	1,4	1,8	1,6	1,8	1,6	3,0	1,8	0,8	0,8	1,6	26,8/98,3
Навоз 20 т/га + NPK экв. / Manure 20 t/ha + NPK eqv.	1	4,4	10,3	3,3	8,0	3,4	4,3	3,9	4,4	3,5	7,3	4,2	2,0	2,0	5,2	-
	2	1,9	4,2	1,4	3,3	1,4	1,8	1,6	1,8	1,4	3,0	1,7	0,8	0,9	1,9	27,1/99,3

Примечания: 1 – урожайность основной и побочной продукции, т/га; 2 – сбор углерода, т / Notes: 1 – yield of main and by-products, t/ha; 2 – carbon harvest, t

Поглощение атмосферного углерода растениями зависит от интенсивности процессов фотосинтеза, который наиболее активно протекает у бобовых, обладающих более высокой ассимиляционной поверхностью листьев, по сравнению со злаковыми культурами. Изменение запасов органического углерода происходило более интенсивно при возделывании козлятника восточного. Козлятник восточный (*Galéga orientalis*) – уникальная многолетняя культура, способствующая перемещению атмосферного углерода в состав почвенного органического вещества посредством заделки растительной биомассы в почву. В процессе вегетации козлятник формирует большую ассимиляционную поверхность, к моменту полного цветения площадь листьев составляет 60–70 тыс. м²/га (60–90 ц/га сухого вещества) [49]. Козлятник восточный формирует в зависимости от гидротермических условий вегетационного периода дополнительно второй укос (2–4 т/га сухой массы) и перед уходом в зиму наращивает зеленую массу в количестве 1–3 т/га на сухое вещество.

За 30 лет бессменного возделывания многолетней бобовой культуры – козлятника восточного запасы углерода в слое 0–20 см повысились на 5,4 т/га, наблюдается увеличение гумусово-аккумулятивного горизонта почвы (A1) до 36 см относительно целинной почвы злаково-разнотравного луга (22 см).

За вегетационный период в процессе фотосинтеза козлятник восточный преобразует из атмосферы в биомассу растений более 30 т/га CO₂, или 8,38 т С/га в год. За счет большого количества и благоприятного биохимического состава пожнивно-корневых остатков козлятника наблюдается накопление органического углерода в почве.

Левзея сафлоровидная (*Rhaponticum carthamoides*) – многолетнее травянистое растение, относится к семейству Астровые или Сложноцветные. Продолжительность периода от весеннего отрастания до первого укоса в Пермском крае составляет 44–52 дня при сумме положительных температур 456,2–676,5 °С, до второго укоса – 44–52 дня после первого скашивания при сумме температур 899,2–1355,7 °С. Для сравнения аккумулированного из атмосферы и накопленного в почве углерода использовали целинный аналог – злаково-разнотравный луг, который является некомплексным неудобренным лугом.

В процессе фотосинтеза количество поглощенного углерода травостоем левзеи сафлоровидной составило 6,8–11,5 т/га (24,3–41,3 т/га CO₂) в зависимости от варианта опыта, естественным фитоценозом – 2,4 т/га углерода (8,6 т/га CO₂) за вегетационный период [53].

Левзея сафлоровидная характеризуется большой надземной и подземной биомассой и продуктивным долголетием. Благодаря большой ассимиляционной поверхности листьев, культура обеспечивает высокую урожайность зеленой массы и пожнивно-корневых остатков. После уборки левзеи сафлоровидной 14-го года жизни в дерново-подзолистой почве определено высокое количество ПКО – 13,7–17,3 т/га. В целинную почву злаково-разнотравного луга ежегодно поступает в среднем по 2,3 т/га зеленой массы, содержание ПКО (войлок) составляет 3,8 т/га. Содержание органического углерода в почве под левзеей сафлоровидной 14-го года жизни обусловлено величиной ежегодного поступления большого количества растительных остатков и скоростью их гумификации, которая определяется качественным составом и гидротермическими условиями. В слое почвы 0–20 см содержание углерода повысилось относительно исходного уровня на 3,6 % в варианте без удобрений и на 15,1 % в варианте N₆₀P₆₀K₆₀, в слое 20–40 см – на 8,8 и 42,6 % соответственно. Относительно целинного аналога под многолетней кормовой культурой в слое 0–20 см содержание углерода было выше на 15,2–28,0 %, в слое 20–40 см – на 25,0–64,4 % в зависимости от варианта опыта, что свидетельствует о депонировании углерода в виде гумусовых веществ в более глубоких слоях почвы.

Анализ почвенного микробиома. На сегодняшний день существует объективная необходимость расширить показатели плодородия и экологического состояния почв для оценки и мониторинга почвенных ресурсов. Анализ почвенного микробиома позволяет выявить такие показатели, как биоразнообразие и численность индикаторных таксонов в почвах сельскохозяйственного назначения, подвергающихся антропогенному воздействию, применяется для определения таксономической структуры сообществ почв разных природных зон и экосистем, поиска связей между экологическими факторами среды, функциональным профилем сообществ микроорганизмов и осуществляемыми им процессами и функциями [54]. Выявлено, что различия между почвами

контрастных природных зон незначительны по сообществам микроорганизмов [55]. При этом анализ таксономического состава бактериальных сообществ позволяет выявлять различия в почвах разных типов землепользования [56]. Экосистемное равновесие в целинной почве поддерживается на основе низкого разнообразия, но более высокой численностью микроорганизмов [57]. Обработка почвы и севооборот влияют на структуру микробиома. При вспашке с оборотом пласта в почве определили больше микроорганизмов, связанных с разложением растительных остатков, циклами углерода и азота, а также эукариот. При минимальной обработке почвы выявлено больше азотфиксирующих ризобий и архей [58]. Микробные сообщества значительно различаются по горизонтам почвы, их состав зависит от активности почвенных процессов (осадки, температура). Микробное сообщество почвы реагирует на внесение органических и минеральных удобрений, известкование и другие антропогенные факторы [59, 60, 61].

Анализ данных высокопроизводительного секвенирования (16S рРНК профилирования) микробных сообществ дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почв Среднего Предуралья выявил 17 филумов, состоящих из доменов *Archaea* (1 филум) и *Bacteria* (16 филумов). Показано, что пахотные почвы характеризуются большим разнообразием (индекс Шеннона и индекс Симпсона) и богатством микроорганизмов, чем целинная почва злаково-разнотравного луга. Среди бактерий наиболее широко представлены филумы *Proteobacteria* (17,06–21,39 %) и *Actinobacteriota* (11,19–20,32 %). Основными классами во всех образцах почв являлись *Actinobacteria* (6,90–17,55 %), *Alphaproteobacteria* (11,03–13,09 %), *Bacteroidia* (4,24–8,90 %), *Gammaproteobacteria* (5,41–8,44 %), *Verrucomicrobiae* (4,57–9,78 %). В пахотной почве вариантов с внесением минеральных и органических удобрений, в отличие от целинной почвы, среди доминирующих выделился класс *Nitrososphaeria* (5,77–9,35 %), представители которого играют важную роль в азотном цикле.

Выявлены различия в составе таксономической структуры пахотной почвы длительного стационарного опыта и целинной почвы злаково-разнотравного луга. В целинной почве не обнаружены бактерии филума *Firmicutes*, при этом значительно больше, чем в пахотной, бактерий филума *Verrucomicrobiota*, бактерий

рода *Candidatus Udaeobacter*, бактерий семейств *Xanthobacteraceae* и *Ilumatobacteraceae*, бактерий рода *Bradyrhizobium*. В пахотной почве отмечено снижение относительно целинной в 2–3 раза филума *Verrucomicrobiota*, выявлено присутствие филума *Firmicutes*, архей рода *Ca. Nitrososphaera*. В вариантах с минеральными и органическими удобрениями наблюдается уменьшение доли филумов: *Actinobacteria*, *Proteobacteria*, *Bacteroidetes*, *Firmicutes*, бактерий рода *Candidatus Udaeobacter* и увеличение доли аммиак-окисляющих архей рода *Candidatus Nitrososphaera*. Известно, что почвенные бактериальные сообщества больше реагируют на изменение почвенной среды, чем на изменение климата или увеличение географического расстояния. В работе [62] выявлены сильные корреляции между относительной численностью представителей *Pirellulaceae* и pH почвы, представителей *Gaiellaceae* и соотношением углерода к азоту, представителей *Bradyrhizobium* и уровнями Olsen P (мера фосфора, доступного растениям), а также представителей *Chitinophagaceae* и концентрацией алюминия. С использованием коэффициента Пирсона нами выявлена положительная значимая корреляция между представительством филумов *Firmicutes*, *Gemmatimonadota*, *Crenarchaeota*, *Nitrospirota*, *Proteobacteria* *Patescibacteria* и содержанием легкогидролизуемого азота в почве. Установлена корреляция филумов *Actinobacteriota*, *Bacteroidota*, *Bdellovibrionota* и *Deinococcota* с минеральным азотом почвы.

Получен большой массив экспериментальных данных по бактериальному и грибному сообществу дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы, требующий серьезного осмысления.

Заключение. Анализ научной литературы и результаты собственных исследований позволяют сделать вывод о том, что в агроценозах прослеживаются три разнонаправленных тенденции изменения органического углерода в почве по сравнению с исходным уровнем при смене режима землепользования: уменьшение содержания $C_{орг}$ при интенсивной механической обработке и отсутствии удобрений; сохранение $C_{орг}$ при внесении удобрений органических и минеральных, обеспечивающих достаточное поступление растительной биомассы в почву; увеличение содержания $C_{орг}$ при минимальной обработке почвы и поступлении большого количества органического вещества с биомассой возделываемых культур

в севообороте и органическими удобрениями или при возделывании многолетних культур в выводных полях, таких как козлятник восточных и левзея сафлоровидная.

На основании полученных экспериментальных данных и обобщения научной литературы установлено, что содержание активных трансформируемых компонентов органического вещества, определяющих эффективное плодородие дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы, выше в целинной почве (0,84–2,67 %), чем в пахотной (0,26–0,64 %). Содержание ЛОВ в агроценозах зависит от многих факторов, однако определяющее значение имеет система землепользования. Установлена корреляционная зависимость между содержанием различных фракций ЛОВ и урожайностью пшеницы – $r = 0,60–0,75$. Показано, что в почвенно-климатических условиях Среднего Предуралья за вегетационный период дерново-подзолистая почва потенциально может терять от 2,37 до 3,21 % от общего содержания углерода в результате его минерализации.

В условиях промывного водного режима исследуемых почв, пониженного содержания обменных оснований из обогащенных целлюлозо-лигнинным комплексом растительных остатков с низким содержанием азота формируются гуминовые кислоты с пониженным содержанием углерода и азота в составе агрегатов ГК. Низкая микробиологическая активность приводит к уменьшению скорости минерализации органического материала – растительных остатков, что способствует возрастанию доли алифатических группировок в супрамолекулярных агрегатах гуминовых кислот. Соотношение Н:С составляет 1,20–1,67.

Изучены показатели микробиологической активности целинной (смешанный лес, злаково-разнотравный луг) и пахотной (бессменный чистый пар, бессменный посев ячменя, полевой севооборот, многолетняя бобовая культура) дерново-подзолистой почвы. Содержание органического вещества, углерода микробной биомассы и удельное микробное дыхание под козлятником восточным соответствовали почве лесной экосистемы. Установлена высокая и средняя корреляционная зависимость содержания углерода микробной биомассы и базального дыхания от общего содержания органического углерода ($r = 0,81–0,90$) и его лабильной фракцией ($r = 0,67–0,79$).

Показано, что микробная биомасса, базальное и субстратиндуцированное дыхание являются индикаторами плодородия почвы.

Почва одновременно выступает как источник, и как хранилище атмосферного углекислого газа. Пахотные почвы – основной объект для управления углеродным циклом. Обобщение научной литературы свидетельствует о том, что рациональное землепользование, ресурсосберегающие технологии, использование генетического ресурса растений и микроорганизмов обеспечит устойчивое развитие сельскохозяйственного производства и позволит смягчить климатическую повестку по парниковым газам. В исследованиях ученых Пермского НИИСХ – филиала ПФИЦ УрО РАН установлено, что пахотная дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва имеет высокий потенциал для секвестрации атмосферного углерода, его накопления и депонирования в почве. Выявлена высокая секвестрационная способность многолетних кормовых культур – козлятника восточного и левзеи сафлоровидной, длительное возделывание которых в выводных полях приводит к повышению органического углерода в пахотном слое на 10–15 % и его депонированию в глубинных горизонтах почвы.

Впервые в условиях Предуралья определено влияние длительного внесения органических и минеральных удобрений на таксономический состав бактериальных сообществ пахотной дерново-подзолистой почвы и проведено сравнение с целинным аналогом. По данным анализа микробных сообществ почвы, выявлено 17 филумов, состоящих из доменов *Archaea* (1 филум) и *Bacteria* (16 филумов). Показано, что анализ почвенного микробиома позволяет выделять различия в составе почвенных микроорганизмов в почвах разных типов землепользования. Выявлены микроорганизмы-индикаторы сельскохозяйственного использования почв, присутствующие только в пахотных почвах, что позволит в будущем управлять плодородием агросистем за счет регулирования качественного и количественного состава определенных таксономических групп микроорганизмов.

Перспективы в изучении органического вещества почв связаны с: раскрытием генетического потенциала почвенных микроорганизмов, участием микробиома в разложении растительных остатков и трансформации органического вещества в почве; подбором культур, обладающих повышенной секвестрационной способностью; разработкой новых

типов севооборотов, обеспечивающих сохранение и повышение органического углерода; применением новых видов органических и органоминеральных удобрений; внесением в почву органических биодобавок (биоуголь и др.), улучшающих структуру почвы и ее гумусное

состояние; поиском путей управления процессами минерализации и гумификации ОБ в почве; выявлением взаимосвязей урожайности сельскохозяйственных культур со строением, составом и свойствами почвенного органического вещества.

Список литературы

1. Семенов В. М., Когут Б. М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
2. Иванов А. Л., Когут Б. М., Семенов В. М., Тюрина Оберландер М., Ваксман Шанбахер Н. Развитие учения о гумусе и почвенном органическом веществе: от Тюрина и Ваксмана до наших дней. Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева. 2017;(90):3–38. DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-90-3-38> EDN: ZTBWRZ
3. Соколов М. С., Спиридонов Ю. А., Торопова Е. Ю., Глинушкин А. П., Семенов А. М. Экологические и фитосанитарные функции почвенного органического вещества (Проблемно-аналитический обзор). Агрохимия. 2018;(5):79–96. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0002188118050113> EDN: XMZHRR
4. Кудеяров В. Н. Агрогеохимические циклы углерода и азота в современном земледелии России. Агрохимия. 2019;(12):3–15. DOI: <https://doi.org/10.1134/S000218811912007X> EDN: NOXCDB
5. Семенов В. М., Тулина А. С. Сравнительная характеристика минерализуемого пула органического вещества в почвах природных и сельскохозяйственных экосистем. Агрохимия. 2011;(12):53–63. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17289782> EDN: NCNLKN
6. Когут Б. М., Семенов В. М., Лукин С. М., Шарков И. Н. Способ определения показателей трансформируемого и инертного органического углерода в почвах: пат. № 2519149 Российская Федерация. №2012116412/15: заявл. 24.04.2012; опубл. 10.06.2014. Бюл. № 16. 6 с. Режим доступа: https://www1.fips.ru/register-doc-view/fips_servlet
7. Мамонтов В. Г., Афанасьев Р. А., Соколовская Е. Л. Лабильные гумусовые вещества – особая группа органических соединений чернозема обыкновенного. Плодородие. 2018;(5):15–19. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36286590> EDN: YLGLCP
8. Мамонтов В. Г., Родионова Л. П., Быковский Ф. Ф., Сирадж А. Лабильное органическое вещество почвы: Номенклатурная схема, методы изучения и агроэкологические функции. Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2000;(4):93–108.
9. Мамонтов В. Г., Родионова Л. П., Бруевич О. М. Уровни содержания лабильных гумусовых веществ в пахотных почвах. Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2009;(4):121–123. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13102344> EDN: LASRRB
10. Торилов В. Е., Мельникова О. В., Сидорова Е. Ю., Мельников Д. М. Изменение плодородия серой лесной почвы в плодосменном севообороте. Агрохимический вестник. 2019;(2):6–9. DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2516-2019-10018> EDN: WBDQOQ
11. Русакова И. В. Изменение содержания общего и легкоразлагаемого органического вещества в дерново-подзолистой почве при длительном применении соломы. Агрохимия. 2022;(10):28–37. DOI: <https://doi.org/10.31857/S000218812210009X> EDN: XFECOG
12. Русакова И. В. Сравнительная оценка влияния традиционной и биологизированной систем земледелия на агрохимические, биологические свойства и биологическое качество органического вещества серой лесной почвы Владимирского ополья. Агрохимия. 2021;(12):15–22. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188121120127> EDN: ZITENY
13. Семенов В. М., Лебедева Т. Н., Паутова Н. Б. Дисперсное органическое вещество в необрабатываемых пахотных почвах. Почвоведение. 2019;(4):440–450. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0032180X19040130> EDN: ZADGWL
14. Семенов В. М., Лебедева Т. Н., Соколова Д. А., Зинякова Н. Б., Лопес де Гереню В. О., Семенов М. В. Измерение почвенных пулов органического углерода, выделенных био-физико-химическими способами фракционирования. Почвоведение. 2023;(9):1155–1172. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600427> EDN: FBYKIZ
15. Фокин А. Д. Устойчивость почв и наземных экосистем: Подходы к систематизации понятий и оценке. Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 1995;(2):71–85.
16. Кершенс М. Значение содержания гумуса для плодородия почв и круговорота азота. Почвоведение. 1992;(10):122–131.
17. Кудеяров В. Н. Почвенное дыхание и секвестрация углерода (обзор). Почвоведение. 2023;(9):1011–1022. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X23990017> EDN: YUFLKS
18. Шарков И. Н., Антипина П. В. Некоторые аспекты углерод-секвестирующей способности пахотных почв. Почвы и окружающая среда. 2022;5(2):3. DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.175> EDN: LMWYAN

19. Глинушкин А. П., Соколов А. А. Роль гумуса почвы к адаптации агросферы к изменению климата земли. *Успехи современной науки*. 2017;2(9):15–19.
Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29905670> EDN: ZELBOT
20. Сычёв В. Г., Налиухин А. Н. Изучение потоков углерода и азота в длительных полевых опытах геосети с целью снижения выбросов парниковых газов и повышения депонирования диоксида углерода агроценозами. *Плодородие*. 2021;(6):38–41. DOI: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.123.10> EDN: MALLBW
21. Завьялова Н. Е. Углеродпротекторная емкость дерново-подзолистой почвы естественных и агро-экосистем Предуралья. *Почвоведение*. 2022;(8):1046–1055. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22080160> EDN: AOKTSG
22. Завьялова Н. Е., Фомин Д. С., Тетерлев И. С. Влияние севооборотов и бессменных посевов на агрохимические свойства и азотный режим дерново-подзолистой почвы Предуралья. *Агрохимия*. 2019;(1):5–10. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002188119010162> EDN: YVTROH
23. Шульц Э., Кершенс М. Характеристика разлагаемой части органического вещества почв и ее трансформации при помощи экстракции горячей водой. *Почвоведение*. 1998;(7):890–894.
24. Орлов Д. С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: МГУ, 1990. 325 с.
25. Завьялова Н. Е., Шишков Д. Г. Влияние минеральных удобрений на урожайность и качество сельскохозяйственных культур в длительном стационарном опыте в климатических условиях Предуралья. *Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии*. 2020;(5):5–17.
DOI: <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2020-5-5-17> EDN: FLTQEI
26. Baveye P. C., Wander M. The (Bio) Chemistry of Soil Humus and Humic Substances: Why Is the «New View» Still Considered Novel After More Than 80 Years? *Frontiers in Environmental Science*. 2019;7(27):1–6. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00027>
27. Kleber M., Sollins P., Sutton R. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces. *Biogeochemistry* 2007;85:9–24.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9103-5>
28. Kleber M., Lehmann J. Humic Substances Extracted by Alkali Are Invalid Proxies for the Dynamics and Functions of Organic Matter in Terrestrial and Aquatic Ecosystems. *Journal of Environmental Quality*. 2019;48(2):207–216. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2019.01.0036>
29. Mohinuzzaman M., Yuan J., Yang X., Senesi N., Li S.-L., Ellam R. M. et al. Insights into solubility of soil humic substances and their fluorescence characterisation in three characteristic soils. *Science Total Environment*. 2020;720:137395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137395>
30. Kholodov V. A., Farkhodov Yu. R., Yaroslavtseva N. V., Aydiev A. Yu., Lazarev V. I., Ilyin B. S. et al. Thermolabile and Thermostable Organic Matter of Chernozems under Different Land Uses. *Eurasian Soil Science*. 2020;53:1066–1078. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229320080086>
31. Olk D. C., Bloom P. R., Perdue E. M., McKnight D. M., Chen Y., Fahrenhorst A. et al. Environmental and agricultural relevance of humic fractions extracted by alkali from soils and natural waters. *Journal of Environmental Quality*. 2019;48(2):217–232. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2019.02.0041>
32. Гасанова Е. С., Мязин Н. Г., Стекольников К. Е. Изменение элементного состава гуминовых кислот чернозема, выщелоченного под влиянием удобрений и мелиоранта на примере культур топинамбура и озимой пшеницы. *Агрохимия*. 2018;(11):27–32. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002188118110042> EDN: VMAWOU
33. Черников В. А. Изменение гумусовых соединений почвы в длительном стационарном опыте ТСХА. *Плодородие*. 2002;(4):34–36.
34. Старых С. Э., Куприянов А. Н., Белопухов С. Л., Мазиров М. А. Изучение влияния длительного применения удобрений на органическое вещество дерново-подзолистой почвы методом ИК-спектроскопии. *Агрохимический вестник*. 2019;(2):17–22. DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2516-2019-109999021> EDN: ZFALQT
35. Шевцова Л. К., Черников В. А., Сычев В. Г., Беличенко М. В., Рухович О. В., Иванова О. И. Влияние длительного применения удобрений на состав, свойства и структурные характеристики гумусовых кислот основных типов почв. Сообщение 1. *Агрохимия*. 2019;(10):3–15. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002188119100120> EDN: UAPMMI
36. Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*. 2015;528:60–68.
DOI: <https://doi.org/10.1038/nature16069>
37. Завьялова Н. Е., Васбиева М. Т., Фомин Д. С. Элементный состав и структура гуминовых кислот дерново-подзолистой почвы длительного стационарного опыта и ее целинных аналогов. *Агрохимия*. 2022;(9):15–25. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188122090149> EDN: RVFDHY
38. Заварзин Г. А., Кудеяров В. Н. Почва как главный источник углекислоты и резервуар органического углерода на территории России. *Вестник Российской академии наук*. 2006;76(1):14–24.
39. Приходько В. Е., Сиземская М. Л. Базальное дыхание и состав микробной биомассы целинных, агро-лесомелиорированных полупустынных почв Северного Прикаспия. *Почвоведение*. 2015;(8):974–983. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X15080043> EDN: TZMCRJ

40. Жукова А. Д., Хомяков Д. М. Показатели микробного дыхания в почвенном покрове импактной зоны предприятия по производству минеральных удобрений. Почвоведение. 2015;(8):984–992. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X15080122> EDN: TZMCRT
41. Полянская Л. М., Звягинцев Д. Г. Содержание и структура микробной биомассы как показатель экологического состояния почв. Почвоведение. 2005;(6):706–714.
42. Insam H., Domsch K. H. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites. Microbial Ecology. 1988;(15):177–188. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02011711>
43. Умаров М. М., Кураков А. В., Степанов А. Л. Микробиологическая трансформация азота в почве. М.: ГЕОС, 2007. 136 с.
44. Завьялова Н. Е., Васбиева М. Т., Фомин Д. С. Микробная биомасса, дыхательная активность и азот-фиксация в дерново-подзолистой почве Предуралья при различном сельскохозяйственном использовании. Почвоведение. 2020;(3):372–378. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X20030120> EDN: COJSQZ
45. Когут Б. М., Семенов В. М., Артемьева З. С., Данченко Н. Н. Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода. Агрохимия. 2021;(5):3–13. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188121050070> EDN: SQOUYM
46. Кудеяров В. Н. Современное состояние углеродного баланса и предельная способность почв к поглощению углерода на территории России. Почвоведение. 2015;(9):1049–1060. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090087> EDN: UDEUPR
47. Körschens M. Soil – Humus – Climate. Practically relevant results of 79 long-term field experiments. «Wahrnehmung und Bewertung von Böden in der Gesellschaft». 2018. 12 p.
48. Kurganova I. N., Lopes de Gerenyu V., Six J., Kuzyakov Y. Carbon cost of collective farming collapse in Russia. Global Change Biology. 2014;20(3):938–947. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12379>
49. Бойцова Л. В., Непримерова С. В., Зинчук Е. Г. Влияние различных систем удобрений на секвестрацию органического углерода в дерново-глеевой почве. Проблемы агрохимии и экологии. 2019;(4):15–20. DOI: <https://doi.org/10.26178/AE.2019.28.73.003> EDN: EUPMKM
50. Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. Plant and Soil. 1997;191:77–87. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1004213929699>
51. Six J., Conant R. T., Paul E. A., Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. Plant and Soil. 2002;241:155–176. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
52. Завьялова Н. Е., Васбиева М. Т., Ямалтдинова В. Р., Казакова И. В. Аккумуляция атмосферного углерода культурами севооборота и влияние систем удобрения на накопление органического углерода пахотной дерново-подзолистой почвой. Агрохимия. 2023;(6):47–56. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188123060121> EDN: QPEMYE
53. Завьялова Н. Е., Майсак Г. П., Казакова И. В., Иванова О. В. Фотосинтетическая и углерод секвестрирующая способность лезвие сафлоровидной и накопление органического углерода в дерново-подзолистой почве. Агрохимия. 2024;(7):48–56. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188124070073> EDN: CFUKTU
54. Baldrian P. The known and the unknown in soil microbial ecology. FEMS Microbiology Ecology. 2019;95(2):fz005. DOI: <https://doi.org/10.1093/femsec/fz005>
55. Fierer N., Leff J. W., Adams B. J., Nielsen U. N., Bates S. T., Lauber C. L., et al. Cross-biome metagenomic analyses of soil microbial communities and their functional attributes. PNAS. 2012;109(52):21390–21395. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1215210110>
56. Yang P., Yuan M., Qu C., Li J., Hua R., Zhao S. et al. Metagenomic insight into the soil microbial functions across land uses. Journal Soils Sediments. 2024;24:3684–3693. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-024-03918-3>
57. Mendes L. W., Tsai S. M., Navarrete A. A., De Hollander M., van Veen J. A., Kuramae E. E. Soil-borne microbiome: linking diversity to function. Microbial Ecology. 2015;70:255–265. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00248-014-0559-2>
58. Souza R. C., Hungria M., Cantao M. E., Vasconcelos A. T. R., Nogueira M. A., Vicente V. A. Metagenomic analysis reveals microbial functional redundancies and specificities in a soil under different tillage and crop-management regimes. Applied Soil Ecology. 2015;86:106–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.10.010>
59. Will C., Thurmer A., Wollherr A., Nacke H., Herold N., Schrumpf M. et al. Horizon-specific bacterial community composition of German grassland soils, as revealed by pyrosequencing-based analysis of 16S rRNA genes. Applied and Environmental Microbiology. 2010;76(20):6751–6759. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.01063-10>
60. Chen C., Zhang J., Lu M., Qin C., Chen Y., Yang L. et al. Microbial communities of an arable soil treated for 8 years with organic and inorganic fertilizers. Biology and Fertility of Soils. 2016;52(4):455–467. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-016-1089-5>
61. Думова В. А., Першина Е. В., Мерзлякова Я. В., Круглов Ю. В., Андронов Е. Е. Основные тенденции в формировании почвенного микробного сообщества в условиях стационарного полевого опыта по данным высокопроизводительного секвенирования библиотек гена 16S-rPHK. Сельскохозяйственная биология. 2013;48(5):85–92. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20602097> EDN: RIVSTL

62. Hermans S. M., Buckley H. L., Case B. S., Curran-Cournane F., Taylor M., Lear G. Bacteria as emerging indicators of soil condition. *Applied and environmental microbiology*. 2017;83(1):e02826-16.
DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.02826-16>

References

1. Semenov V. M., Kogut B. M. Soil organic matter. Moscow: *GEOS*, 2015. 233 p.
2. Ivanov A. L., Kogut B. M., Semenov V. M., Turina Oberlander M., Waksman Schanbacher N. The Development of Theory on Humus and Soil Organic Matter: from Turin and Waksman to Present Days. *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchaeva = Dokuchaev Soil Bulletin*. 2017;(90):3–38. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2017-90-3-38>
3. Sokolov M. S., Spiridonov Yu. A., Toropova E. Yu., Glinushkin A. P., Semenov A. M. Environmental and phytosanitary functions of soil organic matter (Problem-analytic review). *Agrokimiya*. 2018;(5):79–96. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.7868/S0002188118050113>
4. Kudeyarov V. N. The agrobiogeochemical cycles of carbon and nitrogen of Russian croplands. *Agrokimiya*. 2019;(12):3–15. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.1134/S000218811912007X>
5. Semenov V. M., Tulina A. S. Comparative characterization of the mineralizable organic matter pool in the soils of natural and agricultural ecosystems. *Agrokimiya*. 2011;(12):53–63. (In Russ.).
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17289782>
6. Kogut B. M., Semenov V. M., Lukin S. M., Sharkov I. N. A method for determining the parameters of transformed and inert organic carbon in soils: Patent RF, no. 2519149, 2014.
URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet
7. Mamontov V. G., Afanasyev R. A., Sokolovskaya E. L. Labile humus substances – a special group of organic compounds of ordinary chernozem. *Plodorodie*. 2018;(5):15–19. (In Russ.).
URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36286590>
8. Mamontov V. G., Rodionova L. P., Bykovskiy F. F., Siradzh A. Labile soil organic matter: Nomenclature scheme, methods of study and agroecological functions. *Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii = Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2000;(4):93–108. (In Russ.).
9. Mamontov V. G., Rodionova L. P., Bruevich O. M. Levels of content of labile humus substances in arable soils. *Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii = Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2009;(4):121–123. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13102344>
10. Torikov V. E., Melnikova O. V., Sidorova E. Yu., Melnikov D. M. Change of grey forest soil fertility in field crop rotation. *Agrokhimicheskiy vestnik = Agrochemical Herald*. 2019;(2):6–9. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2516-2019-10018>
11. Rusakova I. V. Change in the content of total and easily degradable organic matter in sod-podzolic soil with continuous application of straw. *Agrokimiya*. 2022;(10):28–37. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.31857/S000218812210009X>
12. Rusakova I. V. Comparative evaluation of the effects of traditional and biologized arable systems on agrochemical and biological properties and biological quality of organic matter of gray forest soil in Vladimir opolye. *Agrokimiya*. 2021;(12):15–22. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188121120127>
13. Semenov V. M., Lebedeva T. N., Pautova N. B. Particulate organic matter in noncultivated and arable soils. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2019;(4):440–450. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0032180X19040130>
14. Semenov V. M., Lebedeva T. N., Sokolova D. A., Zinyakovaa N. B., Lopes de Gerenyu V. O., Semenov M. V. Measurement of the soil organic carbon pools isolated using bio-physical-chemical fractionation methods. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2023;(9):1155–1172. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X23600427>
15. Fokin A. D. Sustainability of soils and ground ecosystems: Approaches to the systematization of concepts and assessment. *Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii = Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 1995;(2):71–85. (In Russ.).
16. Kershens M. The significance of humus for soil fertility and nitrogen cycle. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 1992;(10):122–131. (In Russ.).
17. Kudeyarov V. N. Soil respiration and carbon sequestration: a review. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*. 2023;(9):1011–1022. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X23990017>
18. Sharkov I. N., Antipina P. V. Some aspects of carbon sequestration capacity of arable soils. *Pochvy i okruzhayushchaya sreda = The Journal of Soils and Environment*. 2022;5(2):3. (In Russ.).
DOI: <https://doi.org/10.31251/pos.v5i2.175>
19. Glinushkin A. P., Sokolov A. A. Role of soil humus in the adaptation of agrosphere to land climate change. *Uspekhi sovremennoy nauki*. 2017;2(9):15–19. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29905670>

20. Sychev V. G., Naliukhin A. N. Study of flows of carbon and nitrogen in long-term field experiments of the geoset with the purpose of reducing greenhouse gas emissions and increasing the deposition of carbon dioxide by agroecosystems. *Plodorodie*. 2021;(6):38–41. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25680/S19948603.2021.123.10>
21. Zavyalova N. E. Carbon reserves and carbon protective capacity of sod-podzolic soil in natural and agricultural ecosystems of the Pre-Urals. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science. 2022;(8):1046–1055. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22080160>
22. Zavyalova N. E., Fomin D. S., Teterlev I. S. Effect of crop rotations and monoculture on agrochemical properties and nitrogen regime of sod-podzolic soil of the Cis-Ural region. *Agrokhimiya*. 2019;(1):5–10. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002188119010162>
23. Shults E., Kershens M. Characteristics of the degradable part of soil organic matter and its transformation by hot water extraction. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science. 1998;(7):890–894. (In Russ.).
24. Orlov D. S. Humus acids of soils and general theory of humification. Moscow: MGU, 1990. 325 p.
25. Zavyalova N. E., Shishkov D. G. Effect of mineral fertilizers on crop quality and yield in long-term stationary experiment in the climatic conditions of the Cis-Urals. *Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* = Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy. 2020;(5):5–17. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26897/0021-342X-2020-5-5-17>
26. Baveye P. C., Wander M. The (Bio) Chemistry of Soil Humus and Humic Substances: Why Is the «New View» Still Considered Novel After More Than 80 Years? *Frontiers in Environmental Science*. 2019;7(27):1–6. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00027>
27. Kleber M., Sollins P., Sutton R. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces. *Biogeochemistry* 2007;85:9–24. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9103-5>
28. Kleber M., Lehmann J. Humic Substances Extracted by Alkali Are Invalid Proxies for the Dynamics and Functions of Organic Matter in Terrestrial and Aquatic Ecosystems. *Journal of Environmental Quality*. 2019;48(2):207–216. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2019.01.0036>
29. Mohinuzzaman M., Yuan J., Yang X., Senesi N., Li S.-L., Ellam R. M. et al. Insights into solubility of soil humic substances and their fluorescence characterisation in three characteristic soils. *Science Total Environment*. 2020;720:137395. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137395>
30. Kholodov V. A., Farkhodov Yu. R., Yaroslavtseva N. V., Aydiev A. Yu., Lazarev V. I., Ilyin B. S. et al. Thermolabile and Thermostable Organic Matter of Chernozems under Different Land Uses. *Eurasian Soil Science*. 2020;53:1066–1078. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1064229320080086>
31. Olk D. C., Bloom P. R., Perdue E. M., McKnight D. M., Chen Y., Fahrenhorst A. et al. Environmental and agricultural relevance of humic fractions extracted by alkali from soils and natural waters. *Journal of Environmental Quality*. 2019;48(2):217–232. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2019.02.0041>
32. Gasanova E. S., Myazin N. G., Stekolnikov K. E. Change in elemental composition of humic acids of leached chernozem as affected by fertilizers and ameliorant for topinambour and winter wheat crops. *Agrokhimiya*. 2018;(11):27–32. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002188118110042>
33. Chernikov V. A. Changes in humus compounds of soil in a long-term stationary experiment of the TACA. *Plodorodie*. 2002;(4):34–36. (In Russ.).
34. Sarykh S. E., Kupriyanov A. N., Belopukhov S. L., Mazirov M. A. Studying the effect of long-term application of fertilizers on organic matter of soddy-podzolic soil by the method of ir-spectroscopy. *Agrokhimicheskiy vestnik* = Agrochemical Herald. 2019;(2):17–22. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2516-2019-109999021>
35. Shevtsova L. K., Chernikov V. A., Sychev V. G., Belichenko M. V., Rukhovich O. V., Ivanova O. I. Effect of long-term application of fertilizers on the composition, properties and structural characteristics of humic acids in main soil types. Report 1. *Agrokhimiya*. 2019;(10):3–15. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.1134/S0002188119100120>
36. Lehmann J., Kleber M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*. 2015;528:60–68. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature16069>
37. Zavyalova N. E., Vasbieva M. T., Fomin D. S. Elemental composition and structure of humic acids in sod-podzolic soil of a long-term stationary experiment and its virgin anal. *Agrokhimiya*. 2022;(9):15–25. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188122090149>
38. Zavarzin G. A., Kudeyarov V. N. Soil as the key source of carbonic acid and reservoir of organic carbon on the territory of Russia. *Vestnik Rossiyskoy akademii nauk* = Herald of the Russian Academy of Sciences. 2006;76(1):14–24. (In Russ.).
39. Prikhod'ko V. E., Sizemskaya M. L. Basal respiration and composition of microbial biomass in virgin and agroforest-reclaimed semidesert soils of the Northern Caspian region. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science. 2015;(8):974–983. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X15080043>

40. Zhukova A. D., Khomyakov D. M. Parameters of microbial respiration in soils of the impact zone of a mineral fertilizer factory. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science. 2015;(8):984–992. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X15080122>
41. Polyanskaya L. M., Zvyagintsev D. G. The content and composition of microbial biomass as an index of the ecological status of soil. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science. 2005;(6):706–714. (In Russ.).
42. Insam H., Domsch K. H. Relationship between soil organic carbon and microbial biomass on chronosequences of reclamation sites. *Microbial Ecology*. 1988;(15):177–188. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02011711>
43. Umarov M. M., Kurakov A. V., Stepanov A. L. Microbiological transformation of nitrogen in soil. Moscow: GEOS, 2007. 136 p.
44. Zavyalova N. E., Vasbieva M. T., Fomin D. S. Microbial biomass, respiratory activity and nitrogen fixation in soddy-podzolic soils of the Pre-Urals area under various agricultural uses. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science. 2020;(3):372–378. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X20030120>
45. Kogut B. M., Semenov V. M., Artemyeva Z. S., Danchenko N. N. Humus depletion and soil carbon sequestration. *Agrokhimiya*. 2021;(5):3–13. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188121050070>
46. Kudryarov V. N. Current state of the carbon budget and the capacity of Russian soils for carbon sequestration. *Pochvovedenie* = Eurasian Soil Science. 2015;(9):1049–1060. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.7868/S0032180X15090087>
47. Körschens M. Soil – Humus – Climate. Practically relevant results of 79 long-term field experiments. «Wahrnehmung und Bewertung von Böden in der Gesellschaft». 2018. 12 p.
48. Kurganova I. N., Lopes de Gerenyu V., Six J., Kuzyakov Y. Carbon cost of collective farming collapse in Russia. *Global Change Biology*. 2014;20(3):938–947. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12379>
49. Boytsova L. V., Neprimerova S. V., Zinchuk E. G. The effect of various fertilizer systems on sequestration of organic carbon in soddy-gley soil. *Problemy agrokhimii i ekologii* = Problemy agrokhimii i ekologii. 2019;(4):15–20. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.26178/AE.2019.28.73.003>
50. Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil*. 1997;191:77–87. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1004213929699>
51. Six J., Conant R. T., Paul E. A., Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*. 2002;241:155–176. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016125726789>
52. Zavyalova N. E., Vasbieva M. T., Yamaltdinova V. R., Kazakova I. V. Accumulation of atmospheric carbon by crop rotation crops and the effect of fertilizer systems on the accumulation of organic carbon by arable sod-podzolic soil. *Agrokhimiya*. 2023;(6):47–56. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188123060121>
53. Zavyalova N. E., Maysak G. P., Kazakova I. V., Ivanova O. V. Photosynthetic and carbon sequestering ability of safflower leucea and accumulation of organic carbon in sod-podzolic soil. *Agrokhimiya*. 2024;(7):48–56. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002188124070073>
54. Baldrian P. The known and the unknown in soil microbial ecology. *FEMS Microbiology Ecology*. 2019;95(2):fiz005. DOI: <https://doi.org/10.1093/femsec/fiz005>
55. Fierer N., Leff J. W., Adams B. J., Nielsen U. N., Bates S. T., Lauber C. L., et al. Cross-biome metagenomic analyses of soil microbial communities and their functional attributes. *PNAS*. 2012;109(52):21390–21395. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1215210110>
56. Yang P., Yuan M., Qu C., Li J., Hua R., Zhao S. et al. Metagenomic insight into the soil microbial functions across land uses. *Journal Soils Sediments*. 2024;24:3684–3693. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11368-024-03918-3>
57. Mendes L. W., Tsai S. M., Navarrete A. A., De Hollander M., van Veen J. A., Kuramae E. E. Soil-borne microbiome: linking diversity to function. *Microbial Ecology*. 2015;70:255–265. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00248-014-0559-2>
58. Souza R. C., Hungria M., Cantao M. E., Vasconcelos A. T. R., Nogueira M. A., Vicente V. A. Metagenomic analysis reveals microbial functional redundancies and specificities in a soil under different tillage and crop-management regimes. *Applied Soil Ecology*. 2015;86:106–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2014.10.010>
59. Will C., Thurner A., Wollherr A., Nacke H., Herold N., Schrumpf M. et al. Horizon-specific bacterial community composition of German grassland soils, as revealed by pyrosequencing-based analysis of 16S rRNA genes. *Applied and Environmental Microbiology*. 2010;76(20):6751–6759. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.01063-10>
60. Chen C., Zhang J., Lu M., Qin C., Chen Y., Yang L. et al. Microbial communities of an arable soil treated for 8 years with organic and inorganic fertilizers. *Biology and Fertility of Soils*. 2016;52(4):455–467. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-016-1089-5>
61. Dumova V. A., Pershina E. V., Merzlyakova Ya. V., Kruglov Yu. V., Andronov E. E. The main trends in dynamics of soil microbiom during a long-term field experiment as indicated by high throughput sequencing the 16S-rRNA gene libraries. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya* = Agricultural Biology. 2013;48(5):85–92. (In Russ.). URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20602097>
62. Hermans S. M., Buckley H. L., Case B. S., Curran-Cournane F., Taylor M., Lear G. Bacteria as emerging indicators of soil condition. *Applied and environmental microbiology*. 2017;83(1):e02826-16. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.02826-16>

Сведения об авторах

✉ **Завьялова Нина Егоровна**, доктор биол. наук, главный научный сотрудник, Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, д. 12, улица Культуры, с. Лобаново, Пермский край, Российская Федерация, 614532, e-mail: pniish@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4005-8998>, e-mail: nezavyalova@gmail.com

Ямалтдинова Венера Рафхатовна, кандидат с.-х. наук, старший научный сотрудник, Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, д. 12, улица Культуры, с. Лобаново, Пермский край, Российская Федерация, 614532, e-mail: pniish@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2945-0585>

Шишков Данил Глебович, научный сотрудник, Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, д. 12, улица Культуры, с. Лобаново, Пермский край, Российская Федерация, 614532, e-mail: pniish@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6869-9722>

Скрябина София Сергеевна, младший научный сотрудник, Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, д. 12, улица Культуры, с. Лобаново, Пермский край, Российская Федерация, 614532, e-mail: pniish@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8639-4060>

Казакова Инна Владимировна, младший научный сотрудник, Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства – филиал ФГБУН Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук, д. 12, улица Культуры, с. Лобаново, Пермский край, Российская Федерация, 614532, e-mail: pniish@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5962-2967>

Information about the authors

✉ **Nina E. Zavyalova**, DSc in Biological Science, chief researcher, Perm Agricultural Research Institute – branch of Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Lobanovo, Perm Region, Russian Federation, 12, Kultury Street, Lobanovo village, Perm Region, Russian Federation, 614532, e-mail: pniish@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4005-8998>, e-mail: nezavyalova@gmail.com

Venera R. Yamaltdinova, PhD in Agricultural Science, senior researcher, Perm Agricultural Research Institute – branch of Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Lobanovo, Perm Region, Russian Federation, 12, Kultury Street, Lobanovo village, Perm Region, Russian Federation, 614532, e-mail: pniish@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2945-0585>

Danil G. Shishkov, researcher, Perm Agricultural Research Institute – branch of Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Lobanovo, Perm Region, Russian Federation, 12, Kultury Street, Lobanovo village, Perm Region, Russian Federation, 614532, e-mail: pniish@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6869-9722>

Sofia S. Scryabina, junior researcher, Perm Agricultural Research Institute – branch of Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Lobanovo, Perm Region, Russian Federation, 12, Kultury Street, Lobanovo village, Perm Region, Russian Federation, 614532, e-mail: pniish@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8639-4060>

Inna V. Kazakova, junior researcher, Perm Agricultural Research Institute – branch of Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Lobanovo, Perm Region, Russian Federation, 12, Kultury Street, Lobanovo village, Perm Region, Russian Federation, 614532, e-mail: pniish@rambler.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-5962-2967>

✉ – Для контактов / Corresponding author