

DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-5-987

УДК 631.8:631.417.1



Научная статья

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ПОСТУПЛЕНИЕ И ЗАПАСЫ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ЗЕРНОПАРОВОМ СЕВООБОРОТЕ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ ЗАУРАЛЬЯ

Е.А. Дёмин, С.С. Миллер

Обоснование. Органический углерод, входящий в состав гумусовых веществ, является основой плодородия пахотных почв. Интенсивность сельского хозяйства привела к увеличению использования минеральных удобрений, которые оказывают существенное влияние на процессы почвообразования. Это приводит к нарушению естественного динамического равновесия запасов органического углерода, усиливается процесс минерализации органического вещества, что приводит к увеличению эмиссии диоксида углерода. Принятая концепция «4 промилле» призывает мировое общество к разработке системы земледелия наплавленной на увеличение запасов органического углерода пахотными почвами. Исходя из этого, изучение влияния различных элементов системы земледелия, на поступление и закрепление органического углерода пахотными почвами, можно отнести к одной из задач современной аграрной науки.

Цель работы изучить влияние минеральных удобрений на поступление растительных остатков и запасы органического углерода в зернопаровом севообороте в условиях лесостепной зоны Зауралья.

Новизна работы заключается в том, что впервые проведены длительные стационарные исследования по влиянию минеральных удобрений на поступление и запасы органического углерода в пахотных почвах. В последующем имеется возможность теоретически обосновать необходимые дозы минеральных удобрений для получения положительного баланса органического углерода в пахотных почвах Западной Сибири.

Материалы и методы. Исследование проводили в зернопаровом севообороте (занятый пар, яровая пшеница, овес) с 1995 по 2023 года на черноземе выщелоченном, маломощном, тяжелосуглинистом. Ежегодно под яровую пшеницу и овес вносили расчетные дозы минеральных удобрений с учетом

фактического содержания питательных веществ в почве для получения планируемой урожайности зерна от 3,0 до 6,0 т/га. Ежегодно на всех вариантах севооборота определяли массу соломы, пожнивных и корневых остатков, в которых определяли содержание органического углерода и устанавливали массу поступившего углерода в почву. Перед закладкой опыта в 1995 г., а также в 2005; 2015 и 2023 гг. проводили отбор проб почвы с глубины 0-10; 10-20; 20-30; 30-40; 40-60; 60-80; 80-100 см, в которых в дальнейшем определяли содержание органического углерода. Методом пересчета с учетом равновесной плотности сложения определяли запасы органического углерода в метровом слое почвы. Статистическую обработку данных проводили в программе Microsoft Excel.

Результаты. На варианте с естественным уровнем питания за 28 лет в почву поступило 117,3 т/га растительных остатков. Несмотря на это отказ от использования удобрений приводил к отрицательному балансу органического углерода в почве, где снижение запасов составило 6,7% относительно исходных значений. Внесение минеральных удобрений на планируемую урожайность 3,0 и 4,0 т/га зерна приводило к повышению поступления побочной продукции в почву на 25-48% относительно естественного уровня питания. Это обеспечило положительный баланс углерода, где повышение запасов в метровом слое почвы составило 4,2-5,1% относительно исходных значений. Внесение NP на планируемую урожайность 5,0 и 6,0 т/га зерна увеличивало поступления растительных остатков за период исследования на 69-75% относительно контроля. Несмотря на это отмечалось уменьшение запасов органического углерода в метром слое почвы на 4,7-6,4% относительно исходных значений.

Заключение. Отказ от использования минеральных удобрений при возделывании зерновых культур приводит к отрицательному балансу органического углерода, где ежегодные потери углерода достигают 0,44-0,78 т/га. Стабильное внесение удобрений для получения 3,0 и 4,0 т/га зерна обеспечивает положительный баланс углерода в почве, ежегодное повышение запасов составляет от 0,23 до 0,58 т/га. Высокие дозы удобрений для получения урожая от 5,0 до 6,0 т/га зерна приводят к отрицательному балансу углерода в почве, ежегодные потери достигают 0,30-0,55 т/га.

Ключевые слова: минеральные удобрения; органический углерод; солома; пожнивные и корневые остатки; баланс углерода

Для цитирования. Дёмин Е.А., Миллер С.С. Влияние минеральных удобрений на поступление и запасы органического углерода в зернопаровом севообороте лесостепной зоны Зауралья // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2024. Т. 16, №5. С. 262-287. DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-5-987

Original article

INFLUENCE OF MINERAL FERTILIZERS ON THE INCOME AND RESERVES OF ORGANIC CARBON IN THE GRAIN FALLOW CROP ROTATION OF THE FOREST-STEPPE ZONE OF THE TRANS-URALS

E.A. Demin, S.S. Miller

Background. Organic carbon, which is part of humic substances, is the basis for the fertility of arable soils. The intensity of agriculture has led to an increase in the use of mineral fertilizers, which have a significant impact on soil formation processes. This leads to a disruption of the natural dynamic balance of organic carbon reserves, the process of mineralization of organic matter intensifies, which leads to an increase in carbon dioxide emissions. The accepted concept of “4 ppm” calls on the world society to develop a farming system aimed at increasing the reserves of organic carbon in arable soils. Based on this, studying the influence of various elements of crop cultivation technology on the supply and fixation of organic carbon in arable soils can be considered one of the tasks of modern agricultural science.

The purpose of the work is to study the effect of mineral fertilizers on the supply of plant residues and reserves of organic carbon in grain-fallow crop rotation in the conditions of the forest-steppe zone of the Trans-Urals.

The novelty of the work lies in the fact that for the first time long-term stationary studies have been carried out on the effect of mineral fertilizers on the supply and reserves of organic carbon in arable soils. In the future, it will be possible to theoretically substantiate the required doses of mineral fertilizers to obtain a positive balance of organic carbon in arable soils of Western Siberia.

Materials and methods. The study was carried out in grain-fallow crop rotation (full fallow, spring wheat, oats) from 1995 to 2023 on leached, thin, heavy loamy chernozem. Every year, calculated doses of mineral fertilizers were applied to spring wheat and oats for a planned yield of 3.0; 4.0; 5.0 and 6.0 t/ha of grain, taking into account the actual nutrient content in the soil. Every year, the mass of straw, stubble and root residues was determined for all crop rotation options. In which the content of organic carbon was determined annually and the mass of carbon entering the soil was determined. Before the foundation of experience in 1995, as well as in 2005; 2015 and 2023 soil samples were taken from a depth of 0-10; 10-20; 20-30; 30-40;

40-60; 60-80; 80-100 cm. In which the content of organic carbon was subsequently determined. The reserves of organic carbon in a meter layer of soil were determined using the recalculation method taking into account the equilibrium density. Statistical data processing was carried out using Microsoft Excel.

Results. In the option without the use of mineral fertilizers, 117.3 t/ha of plant residues entered the soil during 28 studies. Refusal to use fertilizers led to a negative balance of organic carbon in the soil, where the decrease in reserves was 6.7% relative to the initial values. The application of mineral fertilizers for a planned yield of 3.0 and 4.0 t/ha of grain led to an increase in the flow of by-products into the soil by 25-48% relative to the natural nutrition level. This ensured a positive carbon balance, where the increase in reserves in the meter layer of soil was 4.2-5.1% relative to the initial values. The application of NP to a planned yield of 5.0 and 6.0 t/ha of grain increased the input of plant residues during the study period by 69-75% relative to the control. Despite this, there was a decrease in organic carbon reserves in the meter layer of soil by 4.7-6.4% relative to the initial value.

Conclusion. Refusal to use mineral fertilizers when cultivating grain crops leads to a negative balance of organic carbon, where annual carbon losses reach 0.44-0.78 t/ha. Stable application of fertilizers to obtain 3.0 and 4.0 t/ha of grain ensures a positive carbon balance in the soil, the annual increase in reserves ranges from 0.23 to 0.58 t/ha. High doses of fertilizers to obtain a yield of 5.0 to 6.0 t/ha lead to a negative carbon balance in the soil; annual losses range from 0.30 to 0.55 t/ha.

Keywords: mineral fertilizers; organic carbon; straw; crop and root residues; carbon balance

For citation. Demin E.A., Miller S.S. The Influence of Mineral Fertilizers on the Supply and Reserves of Organic Carbon in the Grain-Fallow Crop Rotation of the Forest-Steppe Zone of the Trans-Urals // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2024, vol. 16, no. 5, pp. 262-287. DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-5-987

Введение

Углерод – элемент, участвующий в процессе круговорота в системе почва-растения-атмосфера. В результате фотосинтеза, растения усваивают атмосферный углерод в виде углекислого газа и накапливают его в органической форме в биомассе. Часть накопленного углерода ежегодно отчуждается с полей с основной продукцией. Другая часть, находящаяся в корневой системе, соломе и других частях растений, остается в пределах агроценоза и в результате сложных биохимических процессов трансформируется в гумусовые вещества почвы, тем самым поддерживая плодородия пашни. В результате процесса минерализации, часть расти-

тельных остатков и органического вещества почвы подвергается дальнейшей трансформации почвенной биотой и переходит в атмосферный углерод в результате эмиссии углекислого газа [27]. Дополнительные потери органического углерода происходят за счет внутрипочвенного стока растворенного органического вещества, однако, в результате того, что данные потери значительно ниже, чем при эмиссии диоксида углерода их принято не учитывать при балансовой оценке динамики изменения запасов органического углерода в почвах [24].

В последнее время изучение динамики органического углерода в агроэкосистемах набирает все больший интерес [18; 22; 26]. Это связано с тем, что в почве сосредоточено в несколько раз больше углерода, чем в атмосфере, наземной биомассе и существует реальная возможность для решения нескольких проблем связанных с глобальным изменением климата и плодородием пахотных почв. Принятая концепция «4 промилле» предполагает разработку технологии по увеличению поступления и закрепления органического углерода пахотными почвами. По мнению ученых это должно обеспечить повышение плодородия пашни, а также нивелировать пагубное воздействие выбросов парниковых газов антропогенного характера [10]. Вторая существенная причина глобального территориального распространения данных исследований связано с тем, что распределение углерода почвах агроэкосистем в большей степени зависит от почвенно-климатических условий, интенсивности системы земледелия, видового состава сельскохозяйственных культур в севообороте и количества используемых средств химизации и удобрений [23; 28].

В последние десятилетие из-за резкого увеличения численности населения и необходимости обеспечения продовольственной безопасности повысилось количество используемых минеральных удобрений для обеспечения продуктивности пашни, а также количество химических средств защиты растений, которые как показывают исследования, оказывают пагубное воздействие на аборигенную почвенную микрофлору [19; 29]. Все это в совокупности приводит к нарушению качественного и количественного состава почвенных микроорганизмов, и в дальнейшем к изменению естественного процесса почвообразования, интенсивности процессов минерализации и гумификации органического вещества, что приводит к изменениям интенсивности эмиссии диоксида углерода в агроэкосистемах и снижению органического вещества в почвах [17; 20].

Стремительный отказ от использования органических удобрений в России, в начале 21 века приводит к резкому снижению запасов гумуса в почвах [16]. Основным оставшийся источник поступления органического

углерода в пахотные почвы – это побочные продукты растениеводства, а именно солома, пожнивные и корневые остатки, которые как показывают исследования, могут стабилизировать изменение запасов гумуса в почвах при подборе соответствующей системы земледелия [25].

Несмотря на разнообразие литературных источников, в настоящее время в научном кругу отсутствует четкое понимание и ведется дискуссия по влиянию различных элементов технологии земледелия на запасы органического углерода в пахотных почвах. Основной причиной этого является то, что подобные исследования требуют проведения длительных стационарных наблюдений в различных почвенно-климатических условиях для корректной оценки направленности трансформации углерода в системе почва-растение-атмосфера, сглаживающих воздействие ежегодных изменений погодных условий. Имеющиеся литературные данные показывают, что распределение углерода в системе почва-растение-атмосфера играет глобальную роль для создания общемировой модели секвестрации углерода в почве и эмиссии CO₂ в атмосферу в зависимости от способов обработки почвы, систем удобрения, защиты растений и тд.

Цель

Изучить особенности влияния минеральных удобрений на поступление растительных остатков и запасы органического углерода в зернопаровом севообороте лесостепной зоны Зауралья.

Материалы и методы

Стационар по влиянию минеральных удобрений на поступление и запасы органического углерода в почве был основан в 1995 году в условиях северной лесостепи и ведется по настоящее время. Почва участка чернозем выщелоченный, маломощный, тяжелосуглинистый. Исследование проводили в зернопаровом севообороте (однолетние травы (горохоовсяная смесь), яровая пшеница, овес). С 1995 по 2007 гг. высевали сорт яровой пшеницы Тулунская-12 и овса Мегион. С 2007 по 2015 гг. сорт яровой пшеницы Красноуфимская-100 и овес сорта Талисман. С 2015 г. по настоящее время высевался сорт яровой пшеницы Новосибирская 31 и овса Отрада.

Система земледелия в опыте была неизменна на протяжении всего времени исследований и являлась традиционной для данной зоны. Ежегодно осенью после уборки предшествующей культуры проводили вспашку на глубину 20-22 см плугом. Далее весной боронили зубowymi боронами в два следа. Перед посевом вносили расчетные дозы минеральных удобрений

на планируемую урожайность яровой пшеницы и овса (врезали сеялками СЗ-3,6), под однолетние травы удобрения не использовали. Дозы рассчитывали ежегодно с учетом фактического содержания питательных веществ в почве, на основе общепринятых нормативных коэффициентов разработанных для данной зоны. В опыте вносили аммиачную селитру с содержанием действующего вещества N_{34} и аммофос $N_{12} \cdot P_{52}$. Калий дополнительно не вносили, так как почвы высоко обеспеченны данным элементом и обеспечивают получение урожая выше 6,0 т/га зерна. В дальнейшем сразу проводили культивацию (КПС-4,0) и после проводили посев (СЗМ-5,4). Схема опыта включала варианты: без внесения удобрений (контроль); с внесением NP для получения урожайности 3,0 т/га; 4,0 т/га; 5,0 т/га и 6,0 т/га. Размер делянок традиционный для агрохимического опыта – 100 м², делянки фиксированные. Исследование проводили в 4-х кратном повторении.

Ежегодно перед уборкой зерновых культур отбирали снопы с высотой среза 10 см с 1 м² в 4-х кратном повторении, после этого снопы обмолачивали. В дальнейшем оставшуюся солому измельчали, высушивали и взвешивали, методом перерасчета устанавливали количество поступающей соломы на гектар. Ежегодно после уборки всех культур на вариантах определяли количество пожнивных и корневых остатков (ПКО) методом Н.З. Станкова в 4-х кратной повторности на каждом варианте. После ПКО сушили, измельчали и взвешивали. В дальнейшем перерасчетом устанавливали ежегодное поступление ПКО на гектар. После в образцах соломы и ПКО определяли содержание органического углерода по ГОСТ 27980, расчетным методом устанавливали ежегодное поступление органического углерода в почву с растительными остатками на каждом варианте. Статистическую обработку данных проводили с использованием программного обеспечения Microsoft Excel. Перед закладкой опыта в 1995 г. проводили отбор проб почвы с размеченных фиксированных делянок почвенным буром с глубины 0-10; 10-20; 20-30; 30-40; 40-60; 60-80 и 80-100 см. В дальнейшем в почве определяли содержание органического углерода по Тюрину (ГОСТ 26213). После проводили расчет запасов органического углерода послойно с учетом равновесной плотности сложения почвы. Дополнительно отбор проб почвы и определение органического углерода проводили по прежней схеме в 2005, 2015 и 2023 гг.

Результаты

Главный источник поступления органического вещества в пахотные почвы – это пожнивные и корневые остатки сельскохозяйственных культур, а также побочные продукты в виде соломы, которые оказывают весо-

мый вклад в баланс органического углерода, биологическую активность, агрохимические и агрофизические свойства почвы [14]. Поступление растительных остатков в почву в агроценозах зависит от интенсивности системы земледелия [15]. За 10 лет в зернопаровом севообороте с 1995 по 2005 года за счет естественного плодородия в почву с побочной продукцией (соломой, пожнивными и корневыми остатками) поступило 43,2 т/га сухого вещества растительных остатков. Около 41% из них приходилось на солому и 59% на пожнивные и корневые остатки. Отказ от использования удобрений приводит к ограниченному образованию растительных остатков из-за недостатка питательных веществ в почве. Внесение удобрений наоборот обеспечивало благоприятный питательный режим, что способствовало большему образованию побочной продукции. Как отмечает И.А. Кубасов (2023) внесение удобрений приводит к увеличению питательных веществ в почве и обеспечивает лучшее развитие культурных растений, что способствует увеличению массы стеблей в 1,5-2,0 раза относительно неудобренного варианта [12]. А.С. Бузуева и др. (2022) отмечают, что внесение минеральных удобрений увеличивает массу корневой системы в среднем на 27,3% относительно естественного уровня питания [5]. Ежегодное внесение удобрений на планируемую урожайность 3,0 т/га зерна с 1995 по 2005 гг. обеспечило повышение поступающих растительных остатков на 17% относительно контроля. Существенный прирост отмечался по поступлению соломы, масса которой была выше контроля на 19% и достигала 21,1 т/га сухого вещества ($HCP_{05}=1,1$ т/га). Количество поступивших пожнивных и корневых остатков было на 3,9 т/га выше варианта без использования удобрений, что на 15% больше значений полученных на контроле при $HCP_{05}=1,8$ т/га (рис.1). На варианте с внесением NP на планируемую урожайность 4,0 т/га зерна количество поступивших растительных остатков за первые десять лет исследований были выше варианта с естественным плодородием почвы на 35% и достигали 58,1 т/га сухого вещества. Из них количество поступившей соломы и ПКО было выше контроля на 41 и 30%, что соответствовало 7,3 и 7,6 т/га сухого вещества. Количество поступивших в почву растительных остатков на варианте с внесением минеральных удобрений на планируемую урожайность 5,0 т/га зерна составляло 63,9 т/га, что выше варианта с естественным плодородием на 48%. Количество поступившей соломы при этом было на 10,5 т/га сухого вещества выше контроля, ПКО на 10,2 т/га. На максимальном изучаемом питательном фоне за первые 10 лет исследования в почву поступило на 22,6 т/га растительных остатков больше, чем на варианте с

естественным уровнем питания. При этом соломы и ПКО в почву поступило на 11,5 и 11,1 т/га больше, что выше варианта с естественным плодородием чернозема выщелоченного на 65 и 44%.

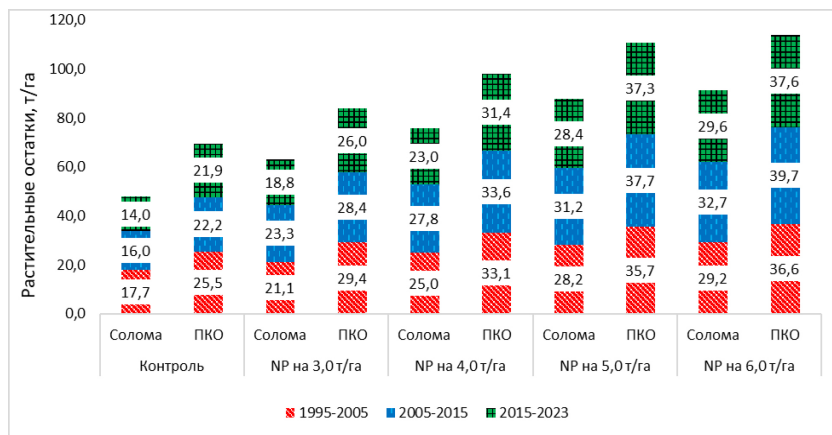
За вторые 10 лет (2005-2015) в почву на контроле поступило 38,2 т/га растительных остатков, что на 12% ниже, чем за первые 10 лет. Соломы при этом поступило на 11% ниже, чем за прошлый анализируемый период, а ПКО на 13%. Это связано с тем, что введенные в 2007 г. в структуру посевных площадей новые сорта выведены для интенсивной технологии системы земледелия и хорошо отзываются на высокий уровень питания, что подтверждается повышением выхода соломы и ПКО на удобренных вариантах. Д.И. Еремин (2021) со своими коллегами отмечает, что сорта овса характеризуются разным отношением к уровню минерального питания. Некоторые сорта интенсивного типа показывают урожайность значительно выше расчетной при использовании минеральных удобрений, но плохо развиваются на вариантах с естественным уровнем питания, другие хорошо проявляют себя на низком питательном фоне [9]. А.А. Казак (2019) отмечает подобную тенденцию по яровой пшенице. Делая акцент на том, что сорта яровой пшеницы, возделываемые в Тюменской области в прошлом веке, при внесении минеральных удобрений формировали зерно плохого качества и были низко продуктивными. Сорта пшеницы нового поколения при внесении минеральных удобрений хорошо отзываются на высокий уровень питания [11]. Внесение NP на планируемую урожайность 3,0 т/га зерна, за период с 2005 по 2015 гг., обеспечило увеличение образования побочной продукции в виде соломы на 10% относительно прошлого периода, тогда как поступление ПКО усилилось на 3%. Стоит отметить, что на этом варианте в почву поступило на 7,3 т/га соломы и 5,1 т/га ПКО больше, чем на контроле. Систематическое внесение удобрений на планируемую урожайность 4,0 т/га зерна обеспечивало повышение поступления побочной продукции в почву на 6%, относительно прошлого периода. Значительно увеличилось поступление в почву растительных остатков в виде соломы, значения которой были на 11% выше, тогда как по поступлению ПКО достоверных изменений не отмечалось. В этот период времени отмечается существенное увеличение поступления побочной продукции относительно контроля на 74% по соломе и 51% по ПКО. За вторые 10 лет исследований на варианте с внесением NP на планируемую урожайность 5,0 т/га зерна отмечалось повышение поступления соломы на 5,0 т/га и ПКО на 2,0 т/га, относительно предыдущего периода исследований. Отмечается также повышенное поступление побочной продукции отно-

сительно варианта без использования удобрений за данный промежуток времени на 95% по соломе и на 70% по ПКО. На максимальном изучаемом питательном фоне отмечалось увеличение поступления растительных остатков на 9% относительно предыдущего периода. При этом поступление соломы и ПКО было на 104 и 79% больше, чем на контроле за данный период времени.

С 2015 года по 2023 год количество поступивших растительных остатков на контроле достигало 35,9 т/га. Внесение удобрений на планируемую урожайность 3,0 т/га зерна увеличивало поступление растительных остатков на 25% относительно контроля, что соответствовало 8,9 т/га. При этом значительно повышалось поступление соломы, значение которой увеличилось на 34%, в то время как поступление ПКО возросло лишь на 19%. Внесение NP на урожайность 4,0 т/га зерна оказывало влияние на поступление растительных остатков, масса которых увеличилась на 52% относительно контроля, что составляло 18,5 т/га. На этом варианте также значительно повышалось поступление соломы – 9,0 т/га. В то время как увеличение поступления ПКО не превышало 5,4 т/га. Дальнейшее повышение уровня минерального питания на планируемую урожайность 5,0 т/га усиливало образование побочной продукции в результате этого, масса поступивших растительных остатков была выше контроля на 83%. На этом варианте, отмечается значительное повышение количества образовавшейся соломы, масса которой в два раза выше, чем на варианте без использования удобрений. В то время как масса ПКО увеличилась относительно контроля лишь на 70%. На максимальном агрофоне в почву поступило 67,2 т/га растительных остатков, что на 87% выше контроля. При этом в сравнении с вариантом NP на 5,0 т/га повышалось поступление соломы лишь на 1,2 т/га, в то время как достоверной разницы в поступлении ПКО не отмечалось, отклонения находились в пределах ошибки исследований.

С растительными остатками в почву поступает органический углерод ($C_{\text{орг}}$), который является важным компонентом в биохимической трансформации гумусовых веществ почвы и основой плодородия. За первые десять лет исследования в почву в зернопаровом севообороте поступило 20,4 т/га органического углерода, большая часть из которого приходилась на ПКО – 12,0 т/га. В результате лучшей продуктивности и образования большего количества растительных остатков на удобренных вариантах в почву поступает значительно больше органического углерода, чем на естественном питательном фоне. На вариантах с высоким уровнем питания отмечается существенное увеличение поступления органического углерода с соломой,

нежели с ПКО. Это связано с особенностью используемых сортов, в которых при высоком уровне питания хорошо образуется вегетативная масса, участвующая в фотосинтезе и процессе формирования репродуктивных органов [3]. В то время как из-за достаточного количества питательных веществ в почве образование корневой системы происходит менее интенсивно [13]. В результате этого на варианте с систематическим внесением минеральных удобрений на планируемую урожайность 3,0 т/га зерна в почву за период с 1995 по 2005 год поступило на 17% $C_{орг}$ больше, чем на контроле, что соответствовало 3,5 т/га. При этом с соломой в почву вернулось на 19% больше $C_{орг}$, чем на контроле, что соответствовало 1,6 т/га при $HCP_{05}=0,9$ т/га, тогда как с ПКО дополнительно поступило 1,9 т/га при $HCP_{05}=1,3$ т/га.



Солома – $HCP_{05}=1,1$ т/га; ПКО – $HCP_{05}=1,8$ т/га
1995-2015 гг. по данным Д.И. Еремина

Рис. 1. Влияние минеральных удобрений на поступление растительных остатков в почву, т/га

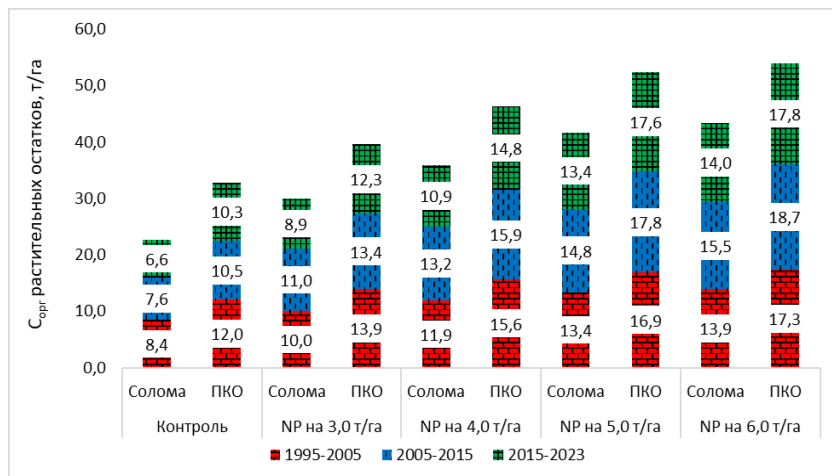
Использование доз минеральных удобрений для получения 4,0 т/га зерна способствовало повышению поступления $C_{орг}$ с соломой на 3,5 т/га и с ПКО на 3,6 т/га относительно контроля, что в совокупности обеспечило увеличение поступившего углерода на 35%.

Дальнейшее повышение уровня минерального питания в севообороте способствовало увеличению поступления $C_{орг}$ на 49% при внесении NP на получение 5,0 т/га и на 53% при NP на получение 6,0 т/га.

С 2005 по 2015 годы на варианте без использования удобрений поступление $C_{орг}$ в почву с соломой существенно не изменилось, отклоне-

ния находились на уровне предыдущего временного интервала. Однако отмечено существенное снижение в поступлении $C_{орг}$ с ПКО, количество которого уменьшилось на 13% относительно предыдущего периода исследований. На варианте с NP на 3,0 т/га зерна отмечено достоверное увеличение поступления $C_{орг}$ с соломой, значения которой выше предыдущих значений на 1,0 т/га, при этом не отмечено изменений в поступлении углерода с ПКО, отклонения находились в пределах неопределенности исследования. Относительно контроля на этом варианте в почву поступило на 18% $C_{орг}$ больше. На варианте с планируемой урожайностью 4,0 т/га зерна отмечено достоверное повышение поступления $C_{орг}$ с соломой на 11%, и не обнаружено существенных различий в поступлении $C_{орг}$ с ПКО. Стоит отметить, что за данный период исследований в почву поступило на 61% $C_{орг}$ больше, чем на варианте без использования удобрений. Внесение удобрений на урожайность 5,0 т/га обеспечивало повышение поступления $C_{орг}$ на 80% относительно контроля. В сравнении с прошлым периодом на этом варианте в настоящее время поступило на 11% $C_{орг}$ больше с соломой, в поступлении углерода с ПКО существенных различий не наблюдалось. На максимально изучаемом питательном фоне отмечено достоверное увлечение поступления $C_{орг}$ с соломой на 12% и с ПКО на 8%, относительно предыдущего периода исследований. При этом относительно контроля в почву поступило с растительными остатками на 89% $C_{орг}$ больше.

Смена сорта, проведенная в 2015 году, показывает, что современные используемые сорта более пластичные к условиям питания и способны образовывать большее количества вегетативной массы и корневой системы даже при условиях дефицита питательных веществ, а также хорошо отзываются на высокий уровень питания, что обеспечивает дополнительное поступление $C_{орг}$ с растительными остатками. В результате этого с 2015 по 2023 год в почву на контроле поступило 6,6 т/га $C_{орг}$ с соломой и 10,3 т/га с ПКО. На варианте с NP на 3,0 т/га с растительными остатками в почву вернулось 21,2 т/га $C_{орг}$, что на 25% выше контроля. На варианте с планируемой урожайностью 4,0 т/га зерна за 8 лет в почву поступило на 65% больше $C_{орг}$ с соломой и на 44% с ПКО, относительно контроля. При внесении удобрений на планируемую урожайность 5,0 т/га зерна в почву за данный период исследования поступило 31 т/га $C_{орг}$, что на 83% выше контроля. На максимально изучаемом фоне поступление в почву $C_{орг}$ с растительными остатками на 88% выше варианта без использования удобрений.



Солома – $HCP_{05}=0,9$ т/га; ПКО – $HCP_{05}=1,3$ т/га

1995-2015 гг. по данным Д.И. Еремина

Рис. 2. Влияние минеральных удобрений на поступление органического углерода с растительными остатками в почву, т/га

Запасы органического углерода в метровом слое почвы перед закладкой опыта в 1995 году варьировали от 234 до 239 т/га. При этом около 62-63% от общих запасов приходилось на пахотный слой 0-30 см. В слое 30-60 см было сосредоточено от 65 до 67 т/га, что соответствовало 28% от общих запасов, в слое 60-100 см было сосредоточено не более 9-10% от общего количества.

Поступления растительных остатков на варианте без использования удобрений не способно стабилизировать отрицательную динамику запасов органического углерода в метровом слое почвы, которая наблюдается на протяжении всего периода исследований. Это связано с тем, что количество поступивших растительных остатков из-за слабой продуктивности зерновых культур на низком питательном фоне не может стабилизировать преобладающий процесс минерализации органического вещества, происходящий в почве. Ежегодная механическая обработка почвы, благодаря улучшению аэрации пахотного слоя, лишь усиливает преобладающий процесс минерализации органического вещества [7]. В результате этого, за 10 лет с 1995 по 2005 год запасы $C_{орг}$ на контроле снизились на 5 т/га, что соответствовало 2,1%. Достоверное снижение отмечено в пахотном слое почвы, где запасы $C_{орг}$ уменьшились на 2 т/га. Смена сортов зерновых

культур в 2007 году привела к снижению количества поступающих растительных остатков, что еще сильнее усугубило процесс дегумификации на контроле. В результате этого за вторые 10 лет сельскохозяйственного использования запасы $C_{\text{орг}}$ уменьшились более существенно на 8 т/га, что на 3,4% ниже предыдущих значений. В пахотном слое почвы запасы $C_{\text{орг}}$ опустились на 6 т/га. Очередная сортосмена, проведенная в 2015 году, на более экологически пластичные сорта способствовала возвращению количества поступающего органического углерода в почву с растительными остатками. Несмотря на это, к 2023 году запасы органического углерода в метровом слое, продолжили снижаться и составили 223 т/га, что на 16 т/га ниже, чем перед закладкой опыта. В слое 0-30 см запасы углерода уменьшились на 12 т/га относительно исходных значений. В слое 30-60 см за 28 лет использования запасы $C_{\text{орг}}$ сократились на 4,5%, что соответствовало 3 т/га.

Внесение минеральных удобрений на планируемую урожайность 3,0 и 4,0 т/га способствовало получению положительного баланса органического углерода в метровом слое почвы на протяжении всего периода исследований. Систематическое внесение удобрений на планируемую урожайность 3,0 т/га зерна за первые 10 лет использования, обеспечило повышение запасов $C_{\text{орг}}$ в метровом слое почвы на 4 т/га. За следующие 10 лет использования (2005-2015), запасы $C_{\text{орг}}$ в слое 0-100 см повысились до 247 т/га. В пахотном слое запасы увеличились на 4%, относительно исходных значений, а в подпахотном слое 30-60 см на 6%. К 2023 году запасы углерода на этом варианте продолжали возрастать, достигая 249 т/га в метровом слое, что на 5,1% выше исходных значений 1995 года. На варианте с внесением удобрений на планируемую урожайность 4,0 т/га, отмечается повышение запасов $C_{\text{орг}}$ в метровом слое почвы лишь к 2015 году, где они увеличились на 7 т/га. В пахотном слое почвы (0-30 см) запасы углерода к 2015 году повысились на 5,4%. К 2023 году в метровом слое запасы $C_{\text{орг}}$ увеличились на 10 т/га, в пахотном слое на 8 т/га относительно 1995 года. Это происходило из-за стабильного получения планируемого урожая зерновых культур на протяжении всего периода исследований. По расчетам Н.В. Абрамова (2013) вероятность получения планируемой урожайности 3,0 и 4,0 т/га зерна культурами для зоны северной лесостепи Зауралья составляет 93 и 78% лет [1]. В результате этого в почве с высокой вероятностью полностью усваиваются расчетные дозы внесенных с минеральными удобрениями питательных веществ, что не усиливало активизацию почвенной биоты и не приводило к усилению процесса минерализации

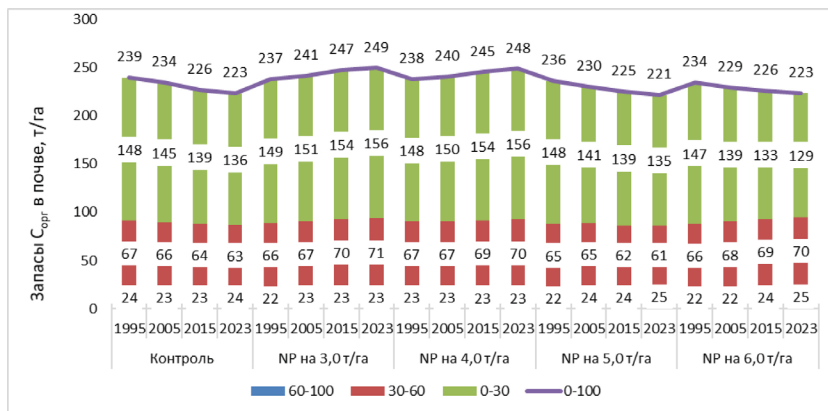
органического вещества. Максимальный положительный баланс органического углерода, отмеченный на вариантах с NP на 3,0 и 4,0 т/га в период с 2005 по 2015 года, связан с наибольшим поступлением органического углерода с растительными остатками. Важный тот момент, что с 2015 по 2023 гг. на варианте с NP на 3,0 т/га, ежегодное повышение запасов углерода относительно варианта в NP на 4,0 т/га зерна снижается. Вероятно это связано с тем, что на варианте с NP на 3,0 т/га содержание органического углерода в почве подходит к границе придела насыщения и перехода в динамическое равновесие.

На высоких уровнях питания NP на 5,0 и 6,0 т/га отмечался отрицательный баланс органического углерода в почве на протяжении всего периода исследования. Это связано с тем, что погодные условия некоторых годов исследования не позволяли стабильно получать планируемую урожайность [2]. Это приводило к снижению образования побочной продукции в виде соломы и ПКО, что снижало потенциально возможное поступление углерода в почву. В результате этого существенная часть питательных веществ оставалась неиспользуемой, что приводило к стимуляции почвенной биоты и усилению процесса минерализации органического вещества почвы [8]. В совокупности эти факторы нивелирует высокое поступление органического углерода в почву с растительными остатками, так как биохимические процессы проходящие в почве в связи с высоким количеством неиспользуемых удобрений приводят к снижению процесса гумификации и усилению минерализации [4].

На варианте с NP на 5,0 т/га запасы углерода на первые 10 лет использования снизились на 6 т/га, при этом в слое 0-30 см этот показатель уменьшился на 7 т/га, однако, повысился в слое 60-100 см на 2 т/га. Это происходило из-за миграции гумусовых веществ вниз по профилю почвы. В результате изменения качественного состава гумуса под действием высоких доз удобрений и длительного сельскохозяйственного использования почвы [6, 21]. К 2015 году в метровом слое почвы запасы $C_{орг}$ снизились на 5 т/га относительно предыдущих значений. Наиболее существенные потери $C_{орг}$ в размере 3 т/га, отмечались в слое 30-60 см. К 2023 году общие запасы $C_{орг}$ сократились на 15 т/га относительно исходных значений. В пахотном слое снижение составило 13 т/га, в подпахотном 3 т/га, однако в слое 60-100 см увеличилось на 2 т/га.

На максимальном изучаемом питательном фоне (NP на 6,0 т/га) за первые 10 лет использования почвы отмечается снижение запасов в метровом слое на 5 т/га. При этом в пахотном слое почвы снижение достигало 8 т/

га, а в слое 30-60 см отмечалось повышение на 2 т/га. К 2023 году потери углерода из почвы составили 11 т/га относительно исходных значений. Отмечалось значительное снижение запасов $C_{\text{орг}}$ на 18 т/га в пахотном слое почвы и его повышение в слое 30-60 см на 9 т/га и слое 60-100 см на 3 т/га. По той же причине, что и на варианте с NP на 5,0 т/га зерна.



Фактор А – Слой почвы НСР₀₅ = 8 т/га; Фактор В – Дозы удобрений НСР₀₅ = 3 т/га;
Фактор С – Год НСР₀₅ = 2 т/га
1995-2015 гг. по данным Д.И. Еремина

Рис. 3. Влияние минеральных удобрений динамику запасов органического углерода в почве, т/га

За первые 10 лет возделывания зерновых культур в зернопаровом севообороте (1995-2005 гг.), снижение запасов органического углерода в метровом слое почвы на варианте без использования минеральных удобрений составило 4,9 т/га (рис.4), что соответствовало ежегодным потерям 0,49 т/га (рис.5). Внесение минеральных удобрений на планируемую урожайность 3,0 и 4,0 т/га зерна обеспечило за первые 10 лет использования повышение запасов органического углерода в метровом слое на 3,7 и 2,3 т/га. Использование высоких доз удобрений с внесением NP на 5,0 и 6,0 т/га зерна приводило к отрицательному балансу $C_{\text{орг}}$, где ежегодные потери составляли 0,55 и 0,48 т/га органического углерода.

С 2005 по 2015 гг. на контроле снижение запасов $C_{\text{орг}}$ в метровом слое почвы, было выше предыдущего периода на 59% и достигало 0,78 т/га в год. На удобренных вариантах с внесением NP на 3,0 и 4,0 т/га запасы $C_{\text{орг}}$ увеличились на 5,8 и 4,6 т/га, что выше, чем в прошлом периоде на 57 и 100% соответственно. На вариантах с высоким питательным фоном (NP

на 5,0 и 6,0 т/га) за данный период исследования отмечалось уменьшение запасов углерода в метровом слое почвы на 5,2 и 3,5 т/га, что ниже, чем за прошлый период исследований на 6 и 27%.

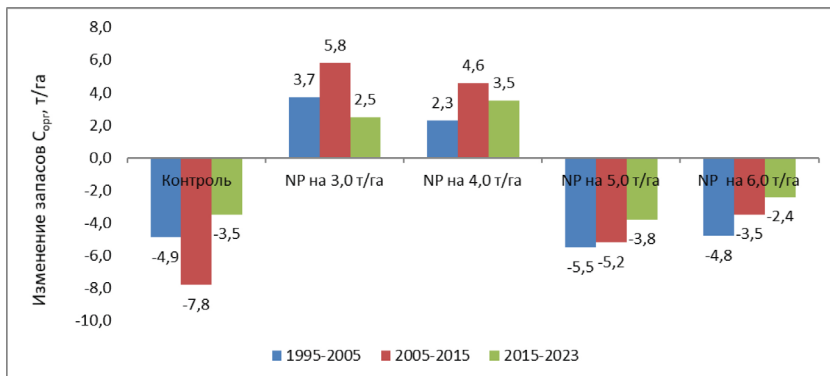


Рис. 4. Влияние минеральных удобрений на изменение запасов органического углерода в метровом слое чернозема выщелоченного, т/га

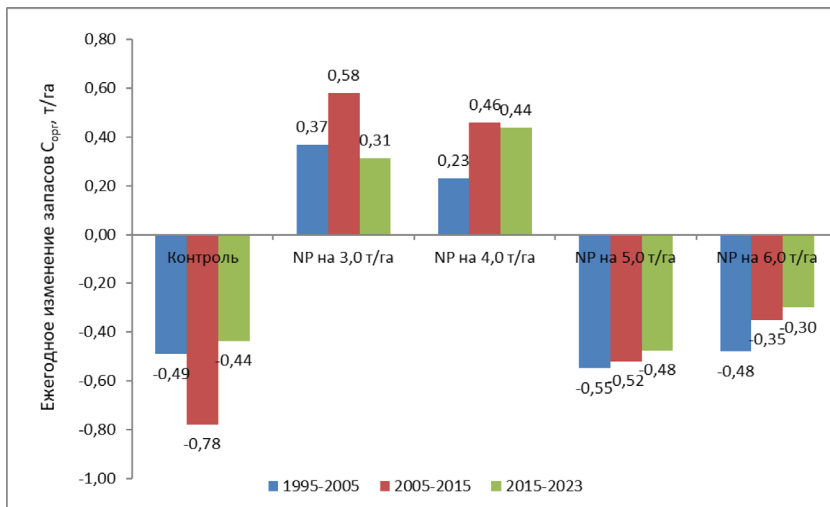


Рис. 5. Влияние минеральных на ежегодное изменение запасов органического углерода в метровом слое чернозема выщелоченного, т/га

С 2015 по 2023 годы запасы углерода в метровом слое почвы на варианте без использования удобрений уменьшились на 3,5 т/га, что соот-

ветствовало ежегодным потерям 0,44 т/га $C_{орг}$. На варианте с NP на 3,0 т/га отмечалось увеличение запасов на 2,5 т/га, что соответствовало ежегодному увеличению на 0,31 т/га. На варианте с NP на 4,0 т/га ежегодное увеличение запасов достигало 0,44 т/га $C_{орг}$ в метровом слое почвы. На вариантах с высоким уровнем питания NP на 5,0 и 6,0 т/га зерна отмечались ежегодные потери $C_{орг}$ в размере 0,48 и 0,30 т/га.

Заключение

Таким образом, минеральные удобрения оказывают существенное влияние на поступление растительных остатков и поступление органического углерода с ними. За первые 10 лет исследования в почву на варианте с естественным плодородием чернозема выщелоченного поступило 43,2 т/га растительных остатков, что соответствовало 20,4 т/га $C_{орг}$. Несмотря на это отмечалось снижение запасов $C_{орг}$ в метровом слое почвы на 5 т/га, что соответствовало ежегодным потерям 0,49 т/га. Внесение минеральных удобрений на планируемую урожайность 3,0 и 4,0 т/га зерна обеспечило увеличение поступления растительных остатков 17-30% относительно контроля. В результате этого, отмечался положительный баланс $C_{орг}$, где ежегодное увеличение достигало 0,37 и 0,23 т/га. На вариантах с внесением NP на планируемую урожайность 5,0 и 6,0 т/га зерна в почву поступало на 48-52% растительных остатков больше, чем на контроле. Несмотря на это из-за нестабильного получения планируемого урожая в связи с неблагоприятными погодными условиями, часть питательных веществ оставалась неизрасходованная, что приводило к активизации почвенной биоты и усилению минерализации органического вещества. В результате этого отмечалось снижение запасов $C_{орг}$ в метровом слое почвы на 4 и 5 т/га. Проведение сортоисмен в 2007 году привело к уменьшению поступления растительных остатков в почву на варианте без использования удобрений на 14% с 2005 по 2015 гг., относительно предыдущего периода. Это привело к потерям 7,8 т/га $C_{орг}$ в метровом слое почвы. На вариантах с планируемой урожайностью 3,0 и 4,0 т/га зерна в этот период отмечено повышение поступления количества растительных остатков на 35-61% относительно контроля. В результате этого отмечалось повышение запасов $C_{орг}$ на 5,8 и 4,6 т/га относительно предыдущего периода. На вариантах с NP на 5,0 и 6,0 т/га зерна, поступление растительных остатков было на 80-90% выше контроля, однако не позволило стабилизировать углеродный баланс почвы. Снижение запасов $C_{орг}$ в метровом слое почвы достигало 0,52 и 0,35 т/га в год. С 2015 по 2023 гг. в почву на всех изучаемых вариантах поступило такое же количество расти-

тельных остатков, как и за предыдущие 10 лет исследования. Это произошло по причине проведенной сортосмены в 2015 году на более пластичные сорта к уровню питания. Несмотря на это на естественном питательном фоне продолжала отмечаться ежегодная потеря $C_{орг}$ в размере 0,44 т/га в год. На вариантах с NP на 3,0 и 4,0 т/га зерна, запасы $C_{орг}$ ежегодно повышались, на 0,31 и 0,44 т/га. На высоком уровне питания (NP на 5,0 и 6,0 т/га) баланс углерода продолжал быть отрицательным, где ежегодные потери $C_{орг}$ достигали 0,48 и 0,30 т/га. За 28 лет исследования в зернопаровом севообороте без использования минеральных удобрений запасы $C_{орг}$ в метровом слое уменьшились на 6,6%, что соответствовало 16 т/га. Стабильное внесение NP на 3,0 и 4,0 т/га зерна обеспечило повышение запасов $C_{орг}$ на 10-12 т/га в метровом слое, в то время как высокие дозы удобрений NP на 5,0 и 6,0 т/га приводили к уменьшению запасов $C_{орг}$ на 4,7-6,3%, что соответствовало 11-15 т/га.

Информация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация о спонсорстве. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-76-10005.

Благодарности. Авторы статьи выражают благодарность доктору биологических наук, ведущему научному сотруднику НИИСХ Северного Зауралья – филиала Тюменского научного центра СО РАН Д.И. Еремину.

Список литературы

1. Абрамов Н.В. Производительность агроэкосистем и состояние плодородия почв в Западной Сибири. Тюмень.: Государственный аграрный университет Северного Зауралья. 2013. 254 с.
2. Абрамов Н.В., Еремин Д.И. Проблемы получения максимально возможной урожайности яровой пшеницы в условиях северного Зауралья // Аграрный вестник Урала. 2009. № 1(55). С. 31-34.
3. Амиров М. Ф. Интенсивность усвоения углерода полевыми культурами в зависимости от технологии возделывания в условиях Республики Татарстан // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021. Т. 16, № 3(63). С. 14-18. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2021-14-18>
4. Ахтямова А.А. Роль запахиваемой соломы в стабилизации гумусового состояния пахотных чернозёмов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2018. № 3(71). С.23-24.
5. Бузуева А.С., Деревягин С.С., Ефимова В.И. [и др.] Особенности развития корневых систем растений различных ценозов в засушливых районах

- Поволжья // Аграрный научный журнал. 2022. № 3. С. 10-14. <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i3pp10-14>
6. Еремин Д.И. Изменение качественного состава гумуса чернозема выщелоченного под действием возрастающих доз минеральных удобрений // Сибирский вестник сельскохозяйственной науки. 2012. № 6(229). С. 20-26.
 7. Еремин Д.И. Изменение содержания и качества гумуса при сельскохозяйственном использовании чернозема выщелоченного лесостепной зоны Зауралья // Почвоведение. 2016. № 5. С. 584-592. <https://doi.org/10.7868/S0032180X1605004X>
 8. Еремин Д.И., Ахтямова А.А. К вопросу стабилизации гумусного состояния пахотных черноземов за счет запашки соломы зерновых культур // Вестник КрасГАУ. 2017. № 4(127). С.8-24.
 9. Еремин Д.И., Моисеева М.Н. Влияние возрастающих доз минеральных удобрений на рост и развитие овса в лесостепи Зауралья // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2021. № 1(87). С. 49-55.
 10. Иванов А.Л., Столбовой В.С. Инициатива «4 промилле» - новый глобальный вызов для почв России // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. № 98. С. 185-202. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-185-202>
 11. Казак А.А., Логинов Ю.П., Еремин Д.И. Влияние минеральных удобрений на урожайность и качество семян сортов пшеницы в северной лесостепи Тюменской области // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2019. № 3. С. 219-229. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.3.219-229>
 12. Кубасов И.А. Динамика накопления надземной массы пшеницы при длительном применении удобрений // Агронаука. 2023. № 4. С. 5-11. <https://doi.org/10.24412/2949-2211-1-4-5-11>
 13. Медведев И.Ф., Сиренко Ф.В., Ефимова В.И., Деревягин С.С. Динамика развития корневой системы яровой пшеницы в условиях активного проявления засух и различной обеспеченности элементами питания растений // Достижения науки и техники АПК. 2013. № 8. С. 6-10.
 14. Постников П.А. Продуктивность севооборотов при использовании приемов биологизации // Аграрный вестник Урала. 2015. № 6(136). С. 20-23.
 15. Свиридов В.И. Формирование бездефицитного баланса почвенного гумуса как необходимое условие совершенствования севооборотов в лесостепной зоне Европейской части Российской Федерации // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 5. С. 6-12.
 16. Akhtariyev R., Miller E., Miller S., Rzaeva V. Corn yield per silo depending on the elements of cultivation technology in Western Siberia // Earth and Envi-

- ronmental Science. 2021 Vol. 839(2) P. 022069. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/2/022069>
17. Ankit L., Saha L., Bauddh K., Kishor V. Impacts of synthetic pesticides on soil health and non-targeted flora and fauna // Ecological and Practical Applications for Sustainable Agriculture. 2020. P. 65-88. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3372-3_4
 18. Chimitdorzhieva G.D., Chimitdorzhieva E.O., Milkheev E.Y. [et al.] Soils of Cryogenic Landforms in the South of the Vitim Plateau: Distribution and Role in the Allocation of Soil Carbon Pools // Eurasian Soil Science. 2019. Vol. 9. P. 1019-1027. <https://doi.org/10.1134/S1064229319090023>
 19. Demin E., Barabanshchikova L. Mineral fertilizers influence on the dynamics of nitrogen, phosphorus and potassium in corn area grown in the forest-steppe zone of Trans-Urals // Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 839. P. 22080. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/2/022080>
 20. Eremin D.I., Demin E.A. The nature of organic carbon and total nitrogen distribution in the fractions of leached chernozem aggregates and gray soil in Western Siberia // Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1043(1). P. 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1043/1/012016>
 21. Eremin D. I. Changes in the content and quality of humus in leached chernozems of the Trans-Ural forest-steppe zone under the impact of their agricultural use // Eurasian Soil Science. 2016. Vol. 5. P. 538-545. doi.org/10.1134/S1064229316050033
 22. Eremina D., Eremin D. Fertility of agrogenic and postagrogenic chernozems of Western Siberia IOP Conference Series: Earth and Environmental Science // International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry. 2019. Vol. 403. P. 012173. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012173>
 23. Feliciano D., Hunter C., Slee B., Smith P. Selecting land-based mitigation practices to reduce GHG emissions from the rural land use sector // North East Scotland Journal of Environmental Management. 2013. Vol. 120. P. 93-104. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.02.010>
 24. Kätterer T., Berglund K., Kirchmann H., Bolinder M. Strategies for carbon sequestration in agricultural soils in Northern Europe // Acta agriculturae scandinavica. Section: Animal Science. 2012 Vol. 62. P. 181-198. <https://doi.org/10.1080/09064702.2013.779316>
 25. Olifir Y., Habryiel A., Partyka T., Havryshko O. Carbon dioxide emission and humus status of Albic Stagnic Luvisol under different fertilization regimes // Biosystems Diversity. 2020. Vol. 28 P. 320-328. <https://doi.org/10.15421/012040>
 26. Ryzhova I., Podvezennaya M. Spatial variability of the organic carbon pool in soils of forest and steppe biogeocenoses // Eurasian Soil Science. 2008. Vol. 41 P. 1260-1267. <https://doi.org/10.1134/S106422930812003X>

27. Smith P Agricultural greenhouse gas mitigation potential globally, in Europe and in the UK: What have we learnt in the last 20 years? // *Global Change Biology*. 2012 Vol. 18. P. 35-43. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02517.x>
28. Sosulski T., Amit K. S., Hella E. A., Bożena S., Magdalena S. Carbon Storage Potential and Carbon Dioxide Emissions from Mineral-Fertilized and Manured Soil // *Applied Sciences*. 2023. Vol. 7. P. 4620. <https://doi.org/10.3390/app13074620>
29. Yang T., Lupwayi N., Marc S. Anthropogenic drivers of soil microbial communities and impacts on soil biological functions in agroecosystems // *Global Ecology and Conservation*. 2021. Vol. 27. P. 01521. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01521>

References

1. Abramov N.V. *Proizvoditel'nost' agroekosistem i sostoyanie plodorodiya pochv v Zapadnoy Sibiri* [Productivity of agroecosystems and soil fertility in Western Siberia]. Tyumen', Gosudarstvennyy agrarnyy universitet Severnogo Zaural'ya, 2013. 253 p.
2. Abramov N.V., Eremin D.I. Problemy polucheniya maksimal'no vozmozhnoy urozhaynosti yarovoy pshenitsy v usloviyakh severnogo Zaural'ya [Problems of obtaining the maximum possible yield of spring wheat in the conditions of the northern Trans-Urals]. *Agrarnyy vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals]. 2009, no. 1(55). pp. 31-34.
3. Amirov M.F. Intensivnost' usvoeniya ugleroda polevymi kul'turami v zavisimosti ot tekhnologii vzdelyvaniya v usloviyakh Respubliki Tatarstan [The intensity of carbon assimilation by field crops depending on cultivation technology in the conditions of the Republic of Tatarstan]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [Bulletin of Kazan State Agrarian University], 2021, no. 3(63). pp. 14-18. <https://doi.org/10.12737/2073-0462-2021-14-18>
4. Akhtyamova A.A. Rol' zapakhivaemoy solomy v stabilizatsii gumusovogo sostoyaniya pakhotnykh chernozemov [The role of plowed straw in stabilizing the humus state of arable chernozems]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [News of the Orenburg State Agrarian University], 2018. no. 3(71). pp. 23-24.
5. Buzueva A.S., Derevyagin S.S., Efimova V.I. [i dr.] Osobennosti razvitiya kornevykh sistem rasteniy razlichnykh tsenozov v zasushlivykh rayonakh Povolzh'ya [Features of the development of root systems of plants of various cenoses in the arid regions of the Volga region]. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal* [Agricultural scientific journal], 2022, no. 3, pp. 10-14. <https://doi.org/10.28983/asj.y2022i3pp10-14>

6. Eremin D.I. Izmenenie kachestvennogo sostava gumusa chernozema vyshchelochennogo pod deystviem vozrastayushchikh doz mineral'nykh udobreniy [Changes in the qualitative composition of leached chernozem humus under the influence of increasing doses of mineral fertilizers]. *Sibirskiy vestnik sel'skokhozyaystvennoy nauki* [Siberian Bulletin of Agricultural Science], 2012. no. 6(229), pp. 20-26.
7. Eremin D.I. Izmenenie soderzhaniya i kachestva gumusa pri sel'skokhozyaystvennom ispol'zovanii chernozema vyshchelochennogo lesostepnoy zony Zaural'ya [Changes in the content and quality of humus during the agricultural use of leached chernozem of the forest-steppe zone of the Trans-Urals]. *Pochvovedenie* [Soil science], 2016, no. 5, pp. 584-592. <https://doi.org/10.7868/S0032180X1605004X>
8. Eremin D.I., Akhtyamova A.A. K voprosu stabilizatsii gumusnogo sostoyaniya pakhotnykh chernozemov za schet zapashki solomy zernovykh kul'tur [On the issue of stabilizing the humus state of arable chernozems by plowing grain crops straw], *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasGAU], 2017, no. 4(127), pp. 8-24.
9. Eremin D.I., Moiseeva M.N. Vliyanie vozrastayushchikh doz mineral'nykh udobreniy na rost i razvitie ovsa v lesostepi Zaural'ya [The influence of increasing doses of mineral fertilizers on the growth and development of oats in the forest-steppe of the Trans-Ural region]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* [News of the Orenburg State Agrarian University], 2021, no. 1(87), pp. 49-55.
10. Ivanov A.L., Stolbovoy V.S. Initsiativa "4 promille" - novyy global'nyy vyzov dlya pochv Rossii [The 4 ppm initiative is a new global challenge for Russian soils]. *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V.V. Dokuchaeva* [Bulletin of the Soil Institute named after. V.V. Dokuchaeva], 2019, no. 98, pp. 185-202. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-185-202>
11. Kazak A.A., Loginov Yu.P., Eremin D.I. Vliyanie mineral'nykh udobreniy na urozhaynost' i kachestvo semyan sortov pshenitsy v severnoy lesostepi Tyumenskoy oblasti [The influence of mineral fertilizers on the yield and quality of seeds of wheat varieties in the northern forest-steppe of the Tyumen region]. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* [Agricultural science of the Euro-North-East], 2019, no. 3, pp. 219-229. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.3.219-229>
12. Kubasov I.A. Dinamika nakopleniya nadzemnoy massy pshenitsy pri dlitel'nom primenении udobreniy [Dynamics of accumulation of above-ground mass of wheat with long-term use of fertilizers]. *Agronauka* [Agroscience], 2023, no. 4, pp. 5-11. <https://doi.org/10.24412/2949-2211-1-4-5-11>

13. Medvedev I.F., Sirenko F.V., Efimova V.I., Derevyagin S.S. Dinamika razvitiya kornevoy sistemy yarovoy pshenitsy v usloviyakh aktivnogo proyavleniya zasukh i razlichnoy obespechennosti elementami pitaniya rasteniy [Dynamics of development of the root system of spring wheat under conditions of active droughts and varying supply of plant nutrients]. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* [Achievements of science and technology of the agro-industrial complex], 2013. no. 8, pp. 6-10.
14. Postnikov P.A. Produktivnost' sevooborotov pri ispol'zovanii priemov biologizatsii [Productivity of crop rotations using biologization techniques]. *Agrarnyy vestnik Urala* [Agrarian Bulletin of the Urals], 2015, no. 6(136), pp. 20-23.
15. Sviridov V.I. Formirovanie bezdefitsitnogo balansa pochvennogo gumusa kak neobkhodimoe uslovie sovershenstvovaniya sevooborotov v lesostepnoy zone Evropeyskoy chasti Rossiyskoy Federatsii [Formation of a deficit-free balance of soil humus as a necessary condition for improving crop rotations in the forest-steppe zone of the European part of the Russian Federation]. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii* [Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy], 2020, no. 5, pp. 6-12.
16. Akhtariyev R., Miller E., Miller S., Rzaeva V. Corn yield per silo depending on the elements of cultivation technology in Western Siberia. *Earth and Environmental Science*, 2021, no. 839(2), pp. 022069. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/2/022069>
17. Ankit L., Saha L., Baudhh K., Kishor V. Impacts of synthetic pesticides on soil health and non-targeted flora and fauna. *Ecological and Practical Applications for Sustainable Agriculture*. 2020, pp. 65-88. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3372-3_4
18. Chimitdorzhieva G.D, Chimitdorzhieva E.O., Milkheev E.Y. [et al.] Soils of Cryogenic Landforms in the South of the Vitim Plateau: Distribution and Role in the Allocation of Soil Carbon Pools. *Eurasian Soil Science*, 2019, Vol. 9, pp. 1019-1027. <https://doi.org/10.1134/S1064229319090023>
19. Demin E., Barabanshchikova L. Mineral fertilizers influence on the dynamics of nitrogen, phosphorus and potassium in corn area grown in the forest-steppe zone of Trans-Urals. *Earth and Environmental Science*, 2021, Vol. 839, pp. 22080. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/839/2/022080>
20. Eremin D.I., Demin E.A. The nature of organic carbon and total nitrogen distribution in the fractions of leached chernozem aggregates and gray soil in Western Siberia. *Earth and Environmental Science* [this link is disabled](#), 2022, Vol. 1043(1), pp. 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1043/1/012016>

21. Eremin D.I. Changes in the content and quality of humus in leached chernozems of the Trans-Ural forest-steppe zone under the impact of their agricultural use. *Eurasian Soil Science*, 2016, Vol. 5, pp. 538-545. doi.org/10.1134/S1064229316050033
22. Eremina D., Eremin D. Fertility of agrogenic and postagrogenic chernozems of Western Siberia IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. *International Scientific Conference on Agricultural Machinery Industry*. 2019, Vol. 403, pp. 012173. https://doi.org/10.1088/1755-1315/403/1/012173
23. Feliciano D., Hunter C., Slee B., Smith P. Selecting land-based mitigation practices to reduce GHG emissions from the rural land use sector. *North East Scotland Journal of Environmental Management*. 2013, Vol. 120, pp. 93-104. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.02.010
24. Kätterer T., Berglund K., Kirchmann H., Bolinder M. Strategies for carbon sequestration in agricultural soils in Northern Europe. *Acta griciculturae candinavica. Section: AnimalScience*, 2012, Vol. 62, pp. 181-198. https://doi.org/10.1080/09064702.2013.779316
25. Olafir Y., Habryiel A., Partyka T., Havryshko O. Carbon dioxide emission and humus status of AlbicStagnicLuvisol under different fertilization regimes. *Bio-systems Diversity*, 2020, Vol. 28, pp. 320-328. https://doi.org/10.15421/012040
26. Ryzhova I., Podvezennaya M. Spatial variability of the organic carbon pool in soils of forest and steppe biogeocenoses. *Eurasian Soil Science*. 2008, Vol. 41, pp. 1260-1267. https://doi.org/10.1134/S106422930812003X
27. Smith P. Agricultural greenhouse gas mitigation potential globally, in Europe and in the UK: What have we learnt in the last 20 years? *Global Change Biology*, 2012, Vol. 18, pp. 35-43. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02517.x
28. Sosulski T., Amit K.S., Hella E.A., Bożena S., Magdalena S. Carbon Storage Potential and Carbon Dioxide Emissions from Mineral-Fertilized and Manured Soil. *Applied Sciences*. 2023, Vol. 7, pp. 4620. https://doi.org/10.3390/app13074620
29. Yang T., Lupwayi N., Marc S. Anthropogenic drivers of soil microbial communities and impacts on soil biological functions in agroecosystems. *Global Ecology and Conservation*. 2021, Vol. 27, pp. 01521. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01521

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

The authors contributed equally to this article.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Дёмин Евгений Александрович, канд. с.-х. наук, ст. науч. сотр.

*Федеральное государственное бюджетное общеобразовательное учреждение высшего образования «Государственный аграрный университет Северного Зауралья»
ул. Республики, 7, Тюмень, 625003, Российская Федерация
gambitn2013@yandex.ru*

Миллер Станислав Сергеевич, канд. с.-х. наук, доцент кафедры земледелия

*Федеральное государственное бюджетное общеобразовательное учреждение высшего образования «Государственный аграрный университет Северного Зауралья»
ул. Республики, 7, Тюмень, 625003, Российская Федерация
millerss@gausz.ru*

DATA ABOUT THE AUTHORS

Evgeniy A. Demin, Ph.D. Agricultural Sciences, Senior Researcher

*State Agrarian University of the Northern Trans-Urals
7, Respubliki Str., Tyumen, 625003, Russian Federation
gambitn2013@yandex.ru
SPIN-code: 4431-2188
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2542-3678>
ResearcherID: P-2963-2017*

Stanislav S. Miller, Ph.D. Agricultural Sciences, Associate Professor, Department of Agriculture

*State Agrarian University of the Northern Trans-Urals
7, Respubliki Str., Tyumen, 625003, Russian Federation
millerss@gausz.ru
SPIN-code: 9819-3821
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2406-0142>
ResearcherID: JKI-2449-2023*

Поступила 05.03.2024

После рецензирования 02.04.2024

Принята 11.04.2024

Received 05.03.2024

Revised 02.04.2024

Accepted 11.04.2024