

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АГРОХИМИКАТОВ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ
РАЗЛОЖЕНИЯ ПОСЛЕУБОРОЧНЫХ ОСТАТКОВ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ В
ТЕМНО-СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЕ****Д. И. Ерёмин, А. В. Любимова**

Реферат. Исследования проводили с целью определения эффективности агрохимикатов, используемых для ускорения разложения послеуборочных остатков яровой пшеницы в темно-серой лесной почве. Работу выполняли в 2023–2024 годы в модельном опыте методом компостирования пахотной темно-серой лесной почвы. Схема опыта предусматривала компостирование соломы яровой пшеницы в течение 12 мес. при оптимальных для развития почвенной микробиоты условиях (температура +20...+22°C; влажность почвы 60...70% от предельно-полевой влагоемкости) с добавлением различных агрохимикатов. Через 1, 2, 3, 6, 9 и 12 мес. солому извлекали и определяли массу неминерализованного остатка, содержание органического углерода, общего азота. Для изучения направленности процесса разложения послеуборочных остатков в почве определяли активность инвертазы, полифенолоксидазы и пероксидазы. При отсутствии агрохимикатов солома яровой пшеницы в темно-серой лесной почве за 2 мес. компостирования не претерпевает существенных изменений. Достоверная ее трансформация происходит в период с 3 по 12 мес. экспозиции. Через год компостирования убыль массы составила 52% от исходной; соотношение углерода к азоту уменьшилось с 79 до 40. Коэффициент гумификации на протяжении всего опыта был равен 1,1...1,2, что указывает на создание оптимальных условий для гумификации соломы в темно-серой лесной почве. Обработка соломы карбамидами аммонийной смесью, гуминовым препаратом Росток, Микробионик деструктор стерни, Биокомпозит корректор ускоряет процесс разложения соломы яровой пшеницы. Максимальный эффект в опыте отмечен при совместном использовании КАС 32, гуминового препарата и одного из биодеструкторов. Через 12 мес. компостирования неминерализованный остаток составил 29%. Опрыскивание соломы азотным удобрением и микробно-ферментативными биодеструкторами создает благоприятные условия для её минерализации. Наиболее результативное ускорения гумификации обеспечивало применение препарата Росток и его сочетание с биодеструкторами – коэффициент гумификации находился в диапазоне 1,2...1,3.

Ключевые слова: коэффициент гумификации, минерализация, биодеструкторы, разложение соломы, ферментативная активность почвы, отношение углерода к азоту, компостирование, лигнин.

Введение. Распространение ресурсосберегающих технологий в агропромышленный комплекс обеспечило повышение продуктивности пашни с одновременным снижением себестоимости получаемой продукции. Вместе с тем это привело к необходимости решения ряда проблем агротехнологического и агробиологического характера. Одна из них – воспроизводство плодородия пашни в условиях отказа от органических удобрений и севооборотов [1]. Причин отказа достаточно много: узкая специализация хозяйства; высокие экономические затраты; нехватка материальных и трудовых ресурсов. Поэтому чаще всего в качестве органических удобрений выступают послеуборочные остатки сельскохозяйственных культур, в том числе солома [2]. Ее химический состав достаточно сильно варьирует и зависит от культуры, технологии возделывания, уровня минерального питания и ряда других факторов [3]. Использование соломы как самостоятельного органического удобрения имеет ряд технологических особенностей – необходимость измельчения с последующей заправкой; длительный срок трансформации в гумус и высвобождения питательных веществ [4]. В случае перехода хозяйства на безотвальную технологию обработки почвы или No-till добавляется еще ряд проблем с наличием соломы на полях, начиная от пожарной опасности и заканчивая снижением

качества посева культур. Помимо этого, важно учитывать, что разлагающаяся на поверхности поля солома многократно увеличивает газообразные потери углерода в виде углекислого газа [5, 6].

Для решения этих проблем аграрному сектору предлагается ускорить процесс разложения соломы и пожнивно-корневых остатков вплоть до полной их минерализации. Использование азотных удобрений для повышения скорости разложения послеуборочных остатков – общеизвестный прием. На протяжении нескольких десятилетий было проведено большое количество полевых и модельных опытов [7]. Мнения исследователей по эффективности азотных удобрений разделились на две группы: одна отмечала резкое ускорение трансформации соломы и пожнивно-корневых остатков; другая – высказывалась об отсутствии значимого эффекта [8].

Давно известна эффективность стимулирования микробного разложения путем активизации местной (аборигенной) микробиоты и внесением бактерий или спор грибов, специализирующихся на деструкции целлюлозы и лигнина. Стимулирование почвенной микробиоты возможно несколькими путями – один из них обработка растительных остатков гуминовыми препаратами, в состав которых входят физиологически активные вещества, в том числе легкоподвижные гумусовые кислоты и

их производные. В составе гуминовых препаратов также находятся аминокислоты, низкомолекулярные белки и другие азотсодержащие водорастворимые органические соединения, которые жизненно важны для бактерий и грибов [9]. Препараты последних поколений обладают мощным эффектом и способны разрушить растительные остатки менее чем за год. Вместе с тем, возникает вполне закономерный вопрос о целесообразности ускорения темпов разложения соломы при отсутствии понимания направленности трансформации. В литературе часто встречается информация о повышении скорости деструкции соломы, высвобождении заключенных в ней питательных веществ [10]. Однако данных о гумификации послеуборочных остатков крайне мало и они противоречивы. В рекламе биодеструкторов и стернифагов, которую доносит их производитель аграриям, всегда указывается, что эти препараты усиливают гумификацию соломы и повышают плодородие. Об этом трудно объективно судить, поскольку чаще всего для исследований используют кратковременные (не более одного года) полевые опыты.

Определение степени гумификации растительных остатков достаточно трудоемкий процесс, требующий проведения многолетних опытов. В модельных опытах, проводимых в оптимальных условиях, целесообразно использовать косвенный метод определения направленности трансформации растительных остатков. Учитывая тот факт, что высокое содержание полифенолоксидазы (ПФО) сопряжено с гумификацией, а пероксидазы (ПО) – с минерализацией органического вещества почвы, расчет отношения ПФО к ПО покажет направленность трансформации растительных остатков.

Модельные опыты в оптимальных условиях, показывающие действительный потенциал приемов и средств ускорения разложения, затруднительны, но наиболее информативны. Именно при таком подходе есть возможность смоделировать многолетнюю трансформацию растительных остатков, исключая периоды очень низкой микробиологической активности почв. Особенно это актуально для условий Сибири, где активность почвенной биоты проявляется со второй половины мая до конца октября [11].

Цель исследований – установить степень эффективности агрохимикатов, используемых для ускорения разложения послеуборочных остатков яровой пшеницы, в темно-серой лесной почве.

Условия, материалы и методы. Работу выполняли в лабораторных условиях с моделированием оптимальных по температуре и влажности условий на протяжении 12 мес. В качестве объекта исследований была использована солома яровой пшеницы сорта Икар. Выбор культуры и сорта обоснован тем, что

яровая пшеница выступает наиболее распространенной в Западной Сибири культурой.

Модельный опыт заложен в отапливаемой теплице НИИСХ Северного Зауралья – филиале ТюмНЦ СО РАН (г. Тюмень). Химический анализ почвы и растительных остатков проводили в агрохимической лаборатории этой же организации. Почву для компостирования заготавливали из пахотного слоя опытного поля НИИСХ Северного Зауралья, где выращивали зерновые культуры. Солома яровой пшеницы была взята с этого же поля. Почва – темно-серая лесная тяжелосуглинистая. Агрохимическая характеристика почвы следующая: содержание гумуса – 5,4% (ГОСТ 23740-2016), обменная кислотность (рН_{сол.}) – 5,8 (ГОСТ Р 58594-2019). Содержание общего азота составляло 0,21% (ГОСТ Р 58596-2019); нитратного – 5,5 мг/кг (ГОСТ 26951-86), что соответствовало низкой обеспеченности; обменного аммонийного – 1,1 мг/кг (ГОСТ 26489-85). Обеспеченность подвижными фосфором и калием была повышенной и высокой (по Чирикову) при содержании 107 и 180 мг/кг (ГОСТ 26204-91) соответственно.

Солому яровой пшеницы резали вручную на фрагменты длиной 1...2 см. Измельченную массу помещали в пакеты, изготовленные из стеклотканевой сетки. Размер ячеек составлял 4 мм² (2 мм × 2 мм); толщина сетки – 0,2 мм. Выбранный материал для пакета обладал биологической инертностью, имел высокую механическую прочность и устойчивость к разрушению. Стеклотканевая сетка обеспечивала максимально возможный контакт почвы и соломы, не препятствовала движению воздуха и воды. Масса пшеничной соломы в пакете перед закладкой опыта варьировала от 20 до 30 г.

Схема опыта предполагала изучение следующих вариантов: препарат (фактор А) – вода (контроль), карбамидо-аммонийная смесь с содержанием азота 32% (КАС32), гуминовый препарат (ГП) Росток, микробионик Деструктор стерни (МДС), Биокомпозит-коррект (БКК), ГП Росток + КАС 32, МДС + КАС 32, БКК + КАС 32, ГП Росток + МДС, ГП Росток + БКК, ГП Росток + МДС + КАС 32, ГП Росток + БКК + КАС 32; срок экспозиции (фактор В) – 1, 2, 3, 6, 9 и 12 мес.

Дозы препаратов и норму расхода рабочей жидкости (600 л/га) применяли согласно рекомендациям производителей, а также основываясь на ранее проведенных исследованиях [12, 13].

В качестве гуминового препарата (ГП) был выбран Росток, производитель ООО «Эврика», который представляет 0,1% раствор гумата натрия с комплексом макро- и микроэлементов. Подробная его характеристика приведена в [14]. Биодеструкторы Микробионик Деструктор стерни (ООО Биокрафт) и Биокомпозит-коррект (АО «Щелково Агрохим») относятся к группе микробно-ферментативных препаратов.

Опрыскивание водой и растворами агрохимикатов при расходе рабочей жидкости 600 л/га проводили с двух сторон пакетов с соломой, непосредственно в день закладки опыта. В качестве компостера использовали пластиковые сосуды объемом 5 л. В них насыпали почву массой 2,5 кг, и вертикально размещали по 4 пакета с соломой, отделяя друг от друга и стенок сосуда слоем почвы. Размеры пакета (15 см × 20 см), толщина – не более 1 см. Досыпали почвой сверху слоем 10 см, обеспечивая максимальный ее контакт с соломой. Почву уплотняли вручную до 1,0... 1,2 г/см³. То есть моделировали процесс заделки соломы в полевых условиях. Общее количество сосудов, используемых в опыте, составило 72 шт.

Сосуды закрывали полиэтиленовой пленкой с отверстиями диаметром до 1,0 см. В ходе компостирования каждый месяц определяли влажность почвы, при необходимости проводили полив водопроводной водой до 60% от предельно-полевой влагоемкости.

По истечению запланированных сроков экспозиции (1, 2, 3, 6 и 12 мес.) от каждого варианта отбирали по 1 сосуду, изымали пакеты с соломой, тщательно промывали проточной водой и, после сушки до воздушно-сухого состояния, солому измельчали в лабораторной мельнице. Содержимое каждого пакета анализировали отдельно, обеспечивая 4-кратное повторение по экспозиции. Определяли: общий азот – по ГОСТ 13496.4-2019; общий углерод – по ГОСТ 23740-79;

активность ферментов (инвертаза, полифенолоксидаза, пероксидаза) – по общепринятым методикам [15, 16].

При отношении ПФО к ПО более единицы складываются оптимальные условия гумификации и чем больше это значение, тем выше степень гумификации растительных остатков. При значениях меньше единицы – растительные остатки подвергаются минерализации [17, 18].

Для оценки достоверности различий между вариантами и контролем применяли t-критерий Фишера для зависимых выборок. Расчет вели с использованием программного продукта Microsoft Excel. Достоверность различий вариантов относительно контроля доказана при $\alpha=0,05$; $df=12$; $t_{крит}=1,038$. Часть результатов исследований подвергали математической обработке методом дисперсионного анализа.

Результаты и обсуждение. Через месяц компостирования масса пшеничной соломы в контроле не уменьшилась – отклонения относительно первоначальных значений были в пределах НСР (табл. 1). Трансформация соломы, выраженная в достоверной потере массы, была зафиксирована только через 2 мес. компостирования. Масса соломы за этот период уменьшилась на 8% относительно исходного состояния. В последующие месяцы темп минерализации соломы возрастал и по истечении 12-ти мес. ее неминерализованный остаток составил 48,0±0,4% от исходной массы.

Таблица 1 – Неминерализованный остаток соломы яровой пшеницы при обработке различными агрохимикатами, % от исходной массы

Препарат (фактор А)	Срок компостирования (фактор В), мес.						Среднее
	1	2	3	6	9	12	
Вода (контроль)	97	92	83	68	56	48	74
КАС 32	96	90	76	62	50	43	70
ГП Росток	96	94	81	63	50	41	71
МДС	90	88	72	61	47	43	67
ББК	92	88	81	64	53	43	70
ГП + КАС 32	96	93	72	55	46	36	66
МДС + КАС 32	90	85	70	54	43	33	63
ББК + КАС 32	90	83	76	57	46	32	64
ГП + МДС	88	84	70	54	43	31	62
ГП + ББК	95	84	76	52	45	34	64
ГП + МДС + КАС 32	92	80	71	52	44	30	62
ГП + ББК + КАС 32	89	78	71	52	42	29	60
Среднее	93	87	75	58	47	37	

НСР₀₅ для факторов, %: А – 7; В – 5; АВ – 4

Рассчитанный коэффициент корреляции ($r>0,95$) показал прямую сильную связь между степенью разложения пшеничной соломы и временем компостирования. Динамику неминерализованных остатков соломы можно выразить следующим уравнением регрессии:

$$y = -4,438x + 97,362 (R^2 = 0,96),$$

где y – доля неминерализовавшихся остатков соломы, % от исходного;

x – количество мес. компостирования;

R^2 – коэффициент детерминации.

В оптимальных для жизнедеятельности почвенной микробиоты условиях, полное разложение соломы яровой пшеницы без применения стимулирующих агрохимикатов произойдет в течение 22 мес.

С учетом климатических изменений на протяжении календарного года, благоприятный период для разложения растительных остатков в лесостепной зоне Западной Сибири будет с мая по сентябрь, то есть не более 5 мес. [19, 20]. Поэтому полная трансформация

запаханной соломы яровой пшеницы составит 5 лет. К аналогичному выводу пришли и другие исследователи, которые проводили изучение трансформации послеуборочных остатков в полевых условиях Западной Сибири [21].

Обработка соломы яровой пшеницы карбамидо-аммонийной смесью с содержанием азота 32% (КАС 32) в дозе 16 л/га не оказала достоверного влияния на скорость ее минерализации в первые два мес. – разница с контролем была в пределах НСР (7%). Через три мес. компостирования активность целлюлозоразрушающей микробиоты возросла – неминерализованный остаток соломы яровой пшеницы уменьшился до 76%, что на 7% меньше контрольного значения. Но в дальнейшем эффект от КАС 32 стал постепенно снижаться, вплоть до выравнивания с контролем – разница была в пределах ошибки опыта (НСР₀₅ = 7%). По окончании годичного компостирования неминерализованный остаток пшеничной соломы в варианте с использованием КАС 32 составил 43% от исходной массы. Различие относительно контроля было в пределах ошибки. Отсутствие эффекта КАС 32 для разложения соломы яровой пшеницы обусловлено низкой активностью и численностью микробиоты в старопахотных темно-серых лесных почвах Западной Сибири [22, 23].

Эффективность ГП Росток в разложении соломы яровой пшеницы проявилась только после 6-месячного компостирования. Стимулирование почвенной микробиоты было незначительным – доля неминерализованного остатка после 6 и 12 мес. компостирования составила 50 и 41% соответственно. Разница с контролем превысила ошибку опыта (5%). Отсутствие серьезного эффекта от опрыскивания соломы гуминовым препаратом, по нашему мнению, обусловлено низкой численностью целлюлозоразрушающей биоты пахотного слоя темно-серой лесной почвы. Основоплагающие причины уменьшения количества микробиоты: ежегодный оборот пахотного слоя во время вспашки, удаление соломы с поля и систематическое применение фунгицидов [24]. Низкая микробиологическая активность пашни стала серьезным аргументом необходимости использования биодеструкторов ферментативно-микробного типа на полях Западной Сибири.

Эффективность МДС проявилась после трех мес. компостирования. За этот период убыль соломы составила 28%, тогда как в контроле – 17% от исходной массы. В последующем эффект МДС в разложении соломы также был достоверным. После 12-ти мес. компостирования в этом варианте неминерализованный остаток составил 43%

БКК проявил себя в меньшей степени – разница в убыли массы соломы относительно контроля была минимальна и граничила с НСР. По завершении опыта неминерализованный остаток в варианте с использованием БКК был на уровне вариантов с КАС 32;

ГП Росток, МДС. Возможной причиной отсутствия эффекта биодеструкторов было то, что обработанная солома не осталась на поверхности, где формируются аэробные условия, необходимые для жизнедеятельности стернефагов. На глубине 10...12 см трансформация растительных остатков происходит при дефиците кислорода, что положительно сказывается на активности гумусообразующей микробиоты. К аналогичному выводу пришли [25].

Повысить эффективность биодеструкторов и сохранить высокие темпы трансформации послеуборочных растительных остатков возможно посредством совместного их применения с азотными удобрениями и гуминовыми препаратами. В наших опытах сочетание биодеструкторов с Ростком и КАС 32 достоверно усилило эффект разложения соломы яровой пшеницы. По окончании 12-ти мес. компостирования её неминерализованный остаток составил лишь треть от исходной массы.

Отсутствие серьезного эффекта от биодеструкторов (МДС и БКК) также может быть вызвано низким содержанием азота в соломе яровой пшеницы. В вариантах, где сочетали КАС с МДС и БКК скорость минерализации возрастала уже во второй мес. компостирования. Эффективность их совместного применения прослеживалась на протяжении всего опыта. Через 12 мес. компостирования от соломы яровой пшеницы осталось 32...33% – разница относительно контроля существенно превышала ошибку опыта.

Отдельного внимания заслуживает вариант с внесением ГП Росток и КАС 32. За первые два мес. компостирования соломы убыль ее массы не отличалась от контроля, но в последующие месяцы, вплоть до завершения опыта, минерализация была максимальной. Учитывая тот факт, что в ГП Росток отсутствует активная микробиота, увеличение скорости минерализации обусловлено стимулированием нарастания местной почвенной микробиоты гуматами и минеральным азотом. Это подтверждается в вариантах, где совместно использовали гуминовый препарат и биодеструкторы растительных остатков. Достоверное повышение скорости разложения соломы отмечено после третьего мес. компостирования и продолжалось на всем протяжении опыта (12 мес.), неминерализованный остаток составил 31...34% от исходной массы соломы яровой пшеницы.

В вариантах с комплексным внесением ГП, КАС 32 и биодеструкторов процесс минерализации соломы не отличался от варианта, где азотные удобрения отсутствовали. Это указывает на возможность регулирования эффективности работы биодеструкторов гуминовыми препаратами, что может стать основой выбора направленности процесса трансформации послеуборочных остатков на полях.

Несмотря на разнообразие сочетаний агрохимикатов в опыте, за один год

компостирования не удалось добиться полной минерализации соломы в изучаемых вариантах: минимальное остаточное количество растительных остатков составляло 29...30% от исходной массы. Используемые в опыте агрохимикаты повышали эффективность минерализации соломы зерновых культур не более чем на 40% относительно контроля.

Для понимания процесса трансформации послеуборочных растительных остатков в почве, крайне важно знать не только убыль массы, но и изменения, происходящие на химическом уровне. К этому можно отнести содержание органического углерода, общего азота и их соотношение в компостируемых остатках.

Перед началом проведения опыта содержание углерода в соломе варьировало незначительно – от 48 до 53% (табл. 2), а азота – от 0,60 до 0,66% (табл. 3) от воздушно-сухой массы.

Содержание органического углерода в соломе контрольного варианта постепенно снижалось и через 12 мес. компостирования достигло 20%, что более чем в 2 раза было ниже исходного значения. Наиболее высокие темпы потери органического углерода отмечали в первые два месяца – с 48 до 38% и в последние 3 мес. компостирования, когда его содержание уменьшилось с 38 до 20%. По мнению [26], это объясняется последовательностью микробно-ферментативной деструкции соломы в почве. В первые месяцы происходит минерализация целлюлозы и гемицеллюлозы, а также имеющихся в соломе простых углеводов. Этот процесс сопровождается выделением диоксида углерода в атмосферу [27]. На поздних этапах трансформации растительных остатков усиливается деструкция

лигнина, который обладает высокой устойчивостью к микробному воздействию. Потери органического углерода в этом случае обусловлены разрушением целлюлозного каркаса и отделением фрагментов лигнина во время отмывки соломы. На этом этапе лигнин, частично трансформируясь, переходит в категорию активных гумусовых веществ.

Обработка соломы изучаемыми агрохимикатами, за исключением варианта БКК + КАС 32, не оказала достоверного влияния на содержание органического углерода после одного месяца компостирования – все отклонения относительно исходной величины были меньше НСР (4%). Сочетание препарата БКК с КАС через месяц компостирования привело к уменьшению содержания органического углерода, что свидетельствует о высоких темпах разложения соломы.

Через 2 мес. компостирования и на протяжении оставшегося срока солома яровой пшеницы активно трансформировалась, о чем свидетельствует изменение содержания органического углерода. Наиболее сильное изменение зафиксировано после трех мес. компостирования в вариантах с применением биодеструкторов совместно с гуминовым препаратом и КАС 32. Содержание органического углерода в этих вариантах достигало 55...60%, что достоверно превышало исходные значения.

По окончании модельного опыта (12 мес.) неминерализованный остаток соломы яровой пшеницы характеризовался различным содержанием органического углерода. В вариантах с использованием КАС 32 и ГП Росток содержание органического углерода в остатках не отличалось от контроля.

Таблица 2 – Динамика содержания органического углерода в компостируемой соломе яровой пшеницы, %

Препарат (фактор А)	Срок компостирования, мес. (фактор В)							Среднее
	исх.	1	2	3	6	9	12	
Вода (контроль)	48	46	38	39	36	38	20	38
КАС 32	51	49	47	42	34	35	23	40
Росток	50	49	45	40	32	33	21	39
МДС	51	48	44	51	33	36	16	40
БКК	49	48	53	50	38	33	18	41
ГП + КАС 32	50	49	46	50	36	38	30	43
МДС + КАС 32	51	49	48	52	41	38	18	42
БКК + КАС 32	53	42	41	59	38	40	15	41
ГП + МДС	50	51	42	56	32	31	19	40
ГП + БКК	48	46	47	51	32	30	22	39
ГП + МДС + КАС 32	50	48	51	60	34	38	30	44
ГП + БКК + КАС 32	51	51	51	55	36	38	32	45
Среднее	50	48	46	50	35	36	22	

НСР₀₅ для факторов, %: А – 4; В – 3; АВ – 5

В вариантах с различным сочетанием агрохимикатов: ГП Росток + КАС 32; ГП + МДС + КАС 32; ГП + БКК + КАС 32 содержание органического углерода через 12 мес. компостирования достоверно превысило контроль. Это служит подтверждением улучшения условий для гумификации соломы.

В отличие от содержания органического углерода в течение всего срока компостирования, динамика общего азота была более сложной. Причина этого в том, что величина содержания общего азота складывается из остаточного количества элемента в компостируемой соломе и микробного азота, содержание

которого зависит от численности микроорганизмов, развивающихся на поверхности растительных остатков, и их активности [28].

В процессе компостирования в течение 2 мес. содержание общего азота в соломе яровой пшеницы в контроле постепенно снижалось с 0,61 до 0,55%, что обусловлено микробиологическими процессами денитрификации и последующей нитрификацией органических форм азота.

После контакта соломы с почвой начинается процесс постепенного нарастания сапрофитной микробиоты на ее поверхности с последующим проникновением внутрь растительных остатков. На третьем мес. компостирования было зафиксировано повышение содержания общего азота в соломе яровой пшеницы с 0,55 до 0,62%. Улучшение азотного состояния происходило и в последующие месяцы компостирования. По завершению 9-ти мес. содержание общего азота достигло максимальных значений – 0,90%. В последние три мес. компостирования было отмечено резкое снижение содержания азота в неминерализованной части соломы.

Обработка КАС 32 не оказала достоверного влияния на содержание общего азота в соломе после месяца компостирования. Через 2 мес. содержание общего азота в соломе, обработанной КАС 32, возросло до 0,76%, что было достоверно выше исходного значения (факт.>теор. при $p=5\%$). После 6-ти мес.

компостирования это значение достигло 0,86% и продолжало повышаться вплоть до 0,99% (9 мес. компостирования). В последние три мес. в неминерализованных остатках соломы содержание азота уменьшилось до исходного значения – 0,67%, что обусловлено снижением активности почвенной микробиоты [29]. По мнению О.В. Орловой и ее коллег, резкое изменение содержания общего азота в растительных остатках вызвано сменой микробиома [30]. Аналогичный эффект был установлен на растительных остатках различного происхождения, компостируемых в серых лесных почвах на протяжении трех лет [31]. Обработка соломы яровой пшеницы ГП Росток имела аналогичный азотному удобрению эффект в отношении содержания общего азота. Его максимальное значение было зафиксировано также после 9 мес. компостирования (0,88%) с последующим снижением до 0,59%.

МДС способствовал снижению содержания общего азота с 0,66 до 0,57% в течение первого мес. компостирования соломы, что свидетельствует об активном процессе минерализации. Нарастание микробной биомассы, и, как следствие, повышение доли общего азота произошло только после трех мес. компостирования. Через 9 мес. его значение достигло 0,87%, но к концу опыта (12 мес.) уменьшилось вдвое. Действие БКК было аналогичным МДС.

Таблица 3 – Динамика содержания общего азота в компостируемой соломе яровой пшеницы, %

Препарат (фактор А)	Срок компостирования, мес. (фактор В)							Среднее
	исх.	1	2	3	6	9	12	
Вода (контроль)	0,61	0,58	0,55	0,62	0,71	0,90	0,51	0,64
КАС 32	0,64	0,64	0,76	0,71	0,86	0,99	0,67	0,75
Росток	0,64	0,65	0,67	0,68	0,78	0,88	0,59	0,70
МДС	0,66	0,57	0,61	0,77	0,82	0,87	0,39	0,67
БКК	0,60	0,58	0,71	0,76	0,87	0,81	0,43	0,68
ГП + КАС 32	0,62	0,65	0,69	0,86	0,91	0,99	0,82	0,79
МДС + КАС 32	0,63	0,63	0,69	0,83	0,92	1,02	0,49	0,74
БКК + КАС 32	0,64	0,53	0,55	0,92	0,90	1,08	0,42	0,72
ГП + МДС	0,63	0,63	0,62	0,82	0,79	0,86	0,58	0,70
ГП + БКК	0,61	0,56	0,60	0,79	0,79	0,83	0,66	0,69
ГП + МДС + КАС 32	0,62	0,66	0,73	0,88	0,87	1,09	0,89	0,82
ГП + БКК + КАС 32	0,64	0,70	0,72	0,82	0,90	1,08	0,90	0,82
Среднее	0,63	0,62	0,66	0,79	0,84	0,95	0,61	
НСР ₀₅ для факторов: А – 0,06%; В – 0,07%; АВ – 0,04%								

Сочетание ГП Росток и КАС 32 предотвратило снижение содержания азота в компостируемой соломе на протяжении первых 3 мес. – разница относительно исходного содержания была в пределах ошибки опыта. В последующем было зафиксировано увеличение до 0,99% доли азота в компостируемой соломе. Важно отметить, что по окончании опыта (12 мес.) содержание азота в неминерализованных остатках уменьшилось незначительно, достигнув 0,82%. Это подтверждает наличие целлюлозоразрушающей микробиоты и продолжение

активного процесса трансформации растительных остатков. Аналогичный эффект был зафиксирован в вариантах, где сочетали все три агрохимиката: ГП + МДС + КАС 32; ГП + БКК + КАС 32 – отмечено сохранение достаточно большого количества общего азота после года компостирования соломы.

Соотношение углерода к азоту в соломе яровой пшеницы достаточно широкое – 77...82, учитывая тот факт, что ее отбор проводили на поле с выравненными агрохимическими свойствами.

После месяца компостирования величина этого показателя достоверно изменилась в вариантах: МДС; ГП + КАС 32; ГП + МДС + КАС 32; БКК + КАС 32 и ГП + МДС + КАС 32; ГП + БКК + КАС 32. Все отклонения в перечисленных вариантах были в пределах НСР (6 ед.) (табл. 4).

Серьезное изменение соотношения углерода к азоту по всем вариантам было

зафиксировано только после 6-ти мес. компостирования. В контроле величина этого показателя уменьшилась с 79 до 51. Изучаемые агрохимикаты, как по отдельности, так и в сочетании друг с другом, способствовали обогащению компостируемых остатков азотом – С:N варьировало в диапазоне 40...44 ед., что достоверно отличалось от контроля ($t_{факт.} > t_{теор.}$ при $p=5\%$).

Таблица 4 – Динамика соотношения углерода к азоту (С:N) в компостируемой соломе яровой пшеницы, ед.

Препарат (фактор А)	Срок компостирования, мес. (фактор В)							Среднее
	исх.	1	2	3	6	9	12	
Вода (контроль)	79	80	69	63	51	43	40	61
КАС 32	79	77	62	60	40	35	35	55
Росток	79	76	67	59	42	38	36	57
МДС	77	84	72	67	40	41	40	60
БКК	82	83	75	66	44	40	41	62
ГП + КАС 32	82	76	67	58	40	38	37	57
МДС + КАС 32	81	78	70	63	44	37	37	59
БКК + КАС 32	82	81	67	65	42	38	36	59
ГП + МДС	80	81	69	69	41	36	33	58
ГП + БКК	78	82	78	65	41	37	34	59
ГП + МДС + КАС 32	82	73	70	68	40	35	34	57
ГП + БКК + КАС 32	81	73	71	68	40	35	35	58
Среднее	80	79	70	64	42	38	37	
НСР ₀₅ для факторов, ед.: А – 6; В – 5; АВ – 7								

В последние три мес. компостирования по всем вариантам была отмечена тенденция дальнейшего снижения соотношения органического углерода к общему азоту.

Процесс микробиологической трансформации растительных остатков достаточно хорошо прослеживается при анализе ферментативной активности почвы. Наиболее информативными в этом отношении выступают инвертаза, полифенолоксидаза и пероксидаза. Накопление инвертазы в почвах чаще всего обусловлено систематическим поступлением растительных остатков с высоким содержанием полисахаридов, в частности крахмала, целлюлозы и гемицеллюлозы.

Анализ исходного содержания инвертазы в каждом сосуде для компостирования показал ее стабильность (13,9...15,4 мг глюкозы/24 ч/1 г почвы) при коэффициенте вариации <5,0%. За три мес. компостирования соломы яровой пшеницы активность инвертазы не отличалась от исходной величины. В последующие мес. В контроле относительная активность инвертазы достоверно возросла на 31...99%, что обусловлено появлением в почве свежих растительных остатков (табл. 5). Обработка соломы КАС 32 привела к резкому увеличению активности инвертазы с 14,3 до 26,8 мг глюкозы/24 ч/1 г почвы. В период с 9 до 12 месяцев активность инвертазы начала снижаться, что обусловлено дефицитом легкодоступных полисахаридов. Опрыскивание соломы ГП Росток не оказало существенного влияния на накопление инвертазы в почве – достоверная разница с контролем зафиксирована только через 12 мес. компостирования соломы.

Использование препаратов МДС и БКК с первого месяца компостирования обеспечило увеличение содержания инвертазы. Ее относительная активность достигала в отдельные периоды 54...128% от исходной величины. Было установлено преимущество БКК относительно МДС, выражаемое тем, что на момент завершения опыта (12 мес.) активность инвертазы оставалась на высоком уровне – 30,3 мг глюкозы/24 ч/1 г почвы, что более чем на 36% выше, чем в варианте с МДС.

Совместное использование биодеструкторов с азотным удобрением достоверно увеличивало активность инвертазы на протяжении 9 мес. компостирования. На заключительном этапе (с 9-го по 12-ый мес.) активность инвертазы значительно снизилась – ее содержание составило 24,9 и 25,7 мг глюкозы/24 ч/1 г почвы, что соответствовало 46 и 38 % относительно исходной активности. Аналогичный эффект вызывает добавление ГП Росток к биодеструкторам.

Полифенолоксидаза и пероксидаза – наиболее важные для почвы ферменты, поскольку их синтез осуществляет микробиота, отвечающая за гумификацию и минерализацию растительных остатков в почве.

В контроле, где солому яровой пшеницы опрыскивали водой, активность полифенолоксидазы постепенно возрастала от 36% на третий мес. до 64% на девятый мес. компостирования. Активность пероксидазы была существенно ниже на протяжении всего опыта (табл.5).

Таблица 5 – Динамика относительной активности ферментов при компостировании темно-серой лесной почвы и соломы яровой пшеницы, обработанной различными агрохимикатами, % от исходного

Вариант	Срок компостирования, мес.											
	3	6	9	12	3	6	9	12	3	6	9	12
	Инвертаза				Полифенолоксидаза				Пероксидаза			
Вода (контроль)	15*	31	78	99	36	27	64	27	23	15*	21	-4*
КАС 32	43	73	84	125	-9*	-23	7*	27	4*	2*	7*	13*
ГП Росток	28	38	78	108	52	75	81	61	25	58	17	12
МДС	74	96	111	54	91	114	65	21	155	243	65	39
БКК	66	93	101	115	128	106	66	48	193	106	87	22
ГП + КАС 32	55	87	106	96	37	0*	16	5*	37	16	35	-19
МДС + КАС 32	86	104	75	46	3*	13*	30	32	38	80	74	32
БКК + КАС 32	88	108	101	38	10*	14*	59	92	76	52	59	92
ГП + МДС	87	97	130	46	100	126	92*	71	78	65	18	5*
ГП + БКК	78	100	112	55	106	129	112	84	132	72	74	38
ГП + МДС + КАС 32	81	97	66	41	-6*	-13*	-9*	9*	25	40	45	24
ГП + БКК + КАС 32	89	104	118	60	17	11*	16	18	33	-1*	85	57

*разница с контролем недостоверна ($t_{\text{факт.}} < t_{\text{теор.}}$ при $p=5\%$)

Обработка соломы азотным удобрением КАС 32 не оказала существенного влияния на активность анализируемых ферментов, в отличие от ГП Росток, при использовании которого активность полифенолоксидазы увеличивалась на 52...81% относительно исходного значения. Активность пероксидазы возросла лишь на 12...58%. Причина всплеска активности полифенолоксидазы при опрыскивании ГП Росток заключается в том, что в составе гумусовых веществ присутствуют различные циклические органические соединения, главным образом, фенольные кольца. Их наличие стимулирует выработку полифенолоксидазы почвенной микробиотой, которая впоследствии будет участвовать в разрушении лигнина и его производных.

Обработка соломы биодеструкторами (МДС и БКК) нарушила не только равновесие между ферментами, но и привела к пиковой активности полифенолоксидазы и пероксидазы в первые полгода компостирования. В этот период активность пероксидазы возросла в 6,7...8,3 раза относительно контроля. Активность полифенолоксидазы возросла лишь в 2,5...3,5 раза, что свидетельствует о нарушении равновесия ферментов в почве.

Совместное использование биодеструкторов и КАС 32 уменьшает ферментативную активность почвы в целом, но нарушение равновесия между полифенолоксидазой и пероксидазой сохранялось на протяжении 12 мес. компостирования. Замена азотного удобрения на гуминовый препарат в вариантах с биодеструкторами восстановила равновесие ферментов на фоне существенного повышения их активности.

Солома яровой пшеницы в ходе компостирования в течение первых 6 мес. в равной степени подвергается минерализации и гумификации – отношение ПФО к ПО составляло 1,0 ед. (табл. 6). В последующем равновесие смещается в сторону синтеза гумусовых веществ – коэффициент

гумификации увеличился до 1,2 ед. Исследования [32] подтвердили этот вывод с позиции биохимической трансформации растительных остатков. В первую очередь почвенная микробиота минерализует простые углеводы и часть целлюлозы, лишенной защитной оболочки из лигнина. И лишь при их отсутствии переходит на разрушение лигнина, который очень быстро трансформируется в гумусовые вещества.

Обработка соломы яровой пшеницы азотными удобрениями (КАС 32) приводила к созданию благоприятных условий для минерализации. Коэффициент гумификации на протяжении всего опыта изменялся от 0,6...0,7 в первой половине срока компостирования до 0,8...0,9 ед. в последующий период. Помимо этого, при любых вариантах с использованием сочетания других агрохимикатов с КАС 32 отмечали аналогичный эффект – минерализация соломы на протяжении целого года компостирования.

Эффект ГП Росток отличался от других препаратов. Помимо создания равновесного состояния в первой половине срока компостирования (6 мес.), в последующем создаются благоприятные условия для гумификации соломы яровой пшеницы. Отношение ПФО к ПО возрастает до 1,3...1,4 ед., что оказалось максимальным в опыте.

Опрыскивание соломы яровой пшеницы МДС обеспечило благоприятные условия для минерализации на протяжении 12 мес. компостирования – коэффициент гумификации не превышал 0,8 ед. Такой эффект обусловлен наличием в препарате микробиоты, специализирующейся на минерализации растительных остатков и возможного содержания в своем составе комплекса энзимов, отвечающих за деструкцию целлюлозы и лигнина. Аналогичный эффект был получен и другими исследователями, которые изучали эффективность биодеструкторов на различных растительных остатках [33, 34].

Таблица 6 – Коэффициент гумификации соломы яровой пшеницы при использовании различных агрохимикатов

Препарат (Фактор А)	Срок компостирования, мес. (фактор В)					Среднее
	исходная	3	6	9	12	
Вода (контроль)	0,9	1,0	1,0	1,2	1,2	1,1
КАС 32	0,8	0,7	0,6	0,8	0,9	0,8
Росток	0,9	1,1	1,0	1,4	1,3	1,1
Микробионик Деструктор стерни	0,8	0,6	0,5	0,8	0,7	0,7
Биокомпозит-коррект	0,9	0,7	0,9	0,8	1,1	0,9
ГП Росток + КАС 32	0,7	0,7	0,6	0,6	0,9	0,7
МДС +КАС 32	0,8	0,6	0,5	0,6	0,8	0,7
БКК + КАС 32	0,8	0,5	0,6	0,8	0,8	0,7
ГП Росток + МДС	0,8	0,9	1,1	1,3	1,3	1,1
ГП Росток + БКК	0,9	0,8	1,2	1,1	1,2	1,0
ГП Росток + МДС + КАС 32	0,8	0,6	0,5	0,5	0,7	0,6
ГП Росток + БКК + КАС 32	0,8	0,7	0,9	0,5	0,6	0,7
Среднее	0,8	0,7	0,8	0,9	1,0	
НСР ₀₅ для факторов: А –1; В –2; АВ –4						

Использование препарата БКК, который также относится к группе биодеструкторов растительных остатков, имело более благоприятный эффект – смещение равновесия в сторону минерализации было не столь выраженным, как у МДС. Отношение полифенолоксидазы (ПФО) к пероксидазе (ПО) на протяжении трех мес. компостирования снизилось до 0,7 ед., что указывает на явный процесс минерализации соломы. В последующие 6 мес. величина этого показателя увеличилась до 0,8...0,9 ед. и в последние три мес. она достигла 1,1 ед., что свидетельствует о благоприятных условиях гумификации соломы яровой пшеницы. Совместное использование МДС и КАС 32 усиливало процесс минерализации – коэффициент гумификации на протяжении всего года варьировал от 0,5 до 0,8 ед. Для закрепления условий гумификации оптимальным выбором будет сочетание МДС или БКК с ГП Росток, что обеспечивает достаточно хороший эффект деструкции (убыль массы соломы) при стабильных условиях гумификации – отношение ПФО к ПО варьирует от 0,8 до 1,3 ед.

Выводы. Солома яровой пшеницы, компостируемая в темно-серой лесной почве в течение 2 мес., не претерпевает существенных изменений, как в количественном, так и качественном отношении. По истечении 12 мес. минерализованный остаток составляет 48% от исходной массы. В естественных условиях

в пахотной темно-серой лесной почве формируются оптимальные условия для гумификации соломы яровой пшеницы – коэффициент гумификации составляет 1,0...1,2 ед.

Использование карбамида-аммонийной смеси, гуминового препарата Росток и биодеструкторов ферментативно-микробного действия достоверно ускоряет трансформацию соломы яровой пшеницы. Увеличение скорости разложения приходится на период с 3 по 9 мес. экспозиции. Сочетание гуминового препарата, КАС 32 и биодеструктора увеличивает минерализацию соломы яровой пшеницы в темно-серой лесной почве на 70%.

Опрыскивание соломы гуминовым препаратом Росток в дозе 1 л/га в сочетании с микробно-ферментативными биодеструкторами обеспечивает ускорение скорости ее гумификации в темно-серой лесной почве.

Сведения о финансировании. Работа финансировалась за счет средств бюджета Научно-исследовательского института сельского хозяйства Северного Зауралья – филиала Федерального исследовательского центра Тюменского научного центра Сибирского отделения РАН в рамках темы FWRZ-2024-0009: «Разработка биоактиватора гумификации послеуборочных растительных остатков в агроценозе». Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Литература

1. Турусов В. И., Коновалова Е. Я. Роль остаточной биомассы культур в регулировании биологической активности почвы в звеньях севооборотов юго-востока ЦЧР // Плодородие. 2024. № 6 (141). С. 5–9. doi: 10.25680/S19948603.2024.141.01.
2. Бобренко И. А., Воронкова Н. А. Использование соломы в земледелии Западной Сибири: рекомендации производству // Омск: Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина. 2022. 24 с.
3. Role of Lignin in Wheat Plant for the Enhancement of Resistance against Lodging and Biotic and Abiotic Stresses. / M. W. Riaz, M. I. Yousaf, Q. Hussain, et al. // Stresses. 2023. No. 3. P. 434–453. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/220d/c89f7430f335736584cbebad51260ede4d.pdf> (дата обращения: 10.02.2025).doi: 10.3390/stresses3020032.
4. Impact of straw returning on soil ecology and crop yield: A review / V. Ninkuu, Zh. Liu, A. Qin, et al. // Heliyon. 2025. Vol. 11. No. 2. e41651. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844025000313> (дата обращения: 10.02.2025). doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e41651.
5. Демин Е. А., Миллер С. С. Влияние различных способов обработки и температуры почвы на эмиссию

углекислого газа в посевах яровой пшеницы в условиях лесостепной зоны Зауралья // Земледелие. 2024. № 4. С. 13–18. doi: 10.24412/0044-3913-2024-4-13-18.

6. Завалин А. А., Карашаева А. С., Хусайнов Х. А. К вопросу эмиссии и секвестирования углерода в земледелии Чеченской Республики // Агрохимический вестник. 2024. № 1. С. 19–23. doi: 10.24412/1029-2551-2024-1-004.

7. Composition and functioning of microbial communities in the decomposition of straw cereals in sod podzolic soil / O. V. Orlova, E. E. Andronov, N. I. Vorobyov, et al. // Agricultural Biology. 2015. Vol. 50. No. 3. P. 305–14. doi: 10.15389/agrobiology.2015.3.305rus.

8. Русаков И. В. Эффективность микробных деструкторов послеуборочных остатков в лабораторных и полевых экспериментах // Владимирский земледелец. 2021. № 2 (96). С. 34–40. doi: 10.24412/2225-2584-2021-2-34-40.

9. Влияние состава и доз органоминерального удобрения на продуктивность культур / И. В. Грехова, Н. В. Литвиненко, В. Ю. Грехова и др. // Вестник КрасГАУ. 2021. № 10 (175). С. 80–87. doi: 10.36718/1819-4036-2021-10-80-87.

10. Влияние микробиологических препаратов и внесения азота на процессы, связанные с секвестрацией органического углерода в чернозёме типичном слабоэродированном / Н. П. Масютенко, А. В. Кузнецов, М. Н. Масютенко и др. // Теоретическая и прикладная экология. 2024. № 1. С. 113–121. doi: 10.25750/1995-4301-2024-1-113-121.

11. Конверсия пашни в залежь увеличивает стабильность органического вещества почвы / Е. А. Филимо-ненко, М. А. Упорова, Е. А. Арбузова и др. // Агрофизика. 2023. № 3. С. 9–16. doi: 10.25695/AGRPH.2023.03.02.

12. Ахтямова А. А., Еремин Д. И. Изменение химического состава соломы яровой пшеницы при использовании гуминового препарата «Росток» в лесостепи Зауралья // Вестник КрасГАУ. 2023. № 4 (193). С. 58–65. doi: 10.36718/1819-4036-2023-4-58-65.

13. Еремин Д. И., Ахтямова А. А. Регулирование скорости разложения запахиваемой соломы в лесостепной зоне Зауралья // Агропродовольственная политика России. 2016. № 12 (60). С. 54–57.

14. Грехова И. В. Гуминовый препарат из низинного торфа // Теоретическая и прикладная экология. 2015. № 1. С. 87–90.

15. Хазиев Ф. Х. Методы почвенной энзимологии. М.: Наука, 2005. 256 с.

16. Козлов А. В. Методы почвенной микробиологии и энзимологии в экосистемных исследованиях. М.: Плодородие, 2023. 152 с.

17. Изменчивость полифенолоксидазной и пероксидазной активности агродерново-подзолистой почвы разной окультуренности с биоуглем / Е. Я. Рижия, Л. В. Бойцова, В. Е. Вертебный и др. // Сельскохозяйственная биология. 2022. Т. 57. № 3. С. 476–485. doi: 10.15389/agrobiology.2022.3.476rus.

18. Bernard T. N. O., George S. A., Firibu K. S. Predictive Modelling of Peroxidase, Polyphenol Oxidase and Catalase in Post-Harvest White Trifoliolate (D. Dumetorum Var.) Yam Tubers. // Food Science & Nutrition Technology. 2020. No. 5 (6). P. 000237. URL: <https://medwinpublishers.com/FSNT/predictive-modelling-of-peroxidase-polyphenol-oxidase-and-catalase-in-post-harvest-white-trifoliolate-d-dumetorum-var-yam-tubers.pdf> (дата обращения 10.02.2025). doi: 10.23880/fsnt-16000237.

19. Изменения почвенной эмиссии CO₂ в таежных экосистемах Центральной Сибири: от суточной до межсезонной динамики / А. В. Махныкина, Д. А. Полосухина, Н. Н. Кошурникова и др. // Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем. 2018. Т. 1. № 3. С. 205–210. doi: 10.23885/2500-395x-2018-1-3-205-210.

20. Зоркина К. А., Горлова О. П. Влияние последствий органических удобрений на состояние мезобиоты и некоторые свойства почв в условиях Красноярской лесостепи // Вестник КрасГАУ. 2017. № 1(124). С. 138–143.

21. Шахова О. А. Интенсивность разложения клетчатки на серых лесных и чернозёмных почвах при использовании различных систем основной обработки в Северном Зауралье // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2022. № 5 (97). С. 9–13.

22. Майсямова Д. Р., Еремин Д. И. Изменение микрофлоры пахотного чернозема лесостепной зоны Зауралья под действием механической обработки // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2020. № 1 (183). С. 17–27.

23. Перфильев Н. В., Вьюшина О. А. Биологическая активность темно-серой лесной почвы и урожайность ячменя в зависимости от различных систем основной обработки // Вестник КрасГАУ. 2023. № 7 (196). С. 3–11. doi: 10.36718/1819-4036-2023-7-3-11.

24. Sahab S., Suhani I., Singh R. P. Valuing each patch of land: Utilizing plant-microbe interactions for the betterment of agriculture // Microbes in Land Use Change Management. 2021. P. 471–507. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128244487000292> (дата обращения: 10.02.2025). doi: 10.1016/B978-0-12-824448-7.00024-3.

25. Влияние биопрепаратов на почвенное органическое вещество, структурное и биологическое состояние чернозема типичного слабоэродированного / Н. П. Масютенко, А. В. Кузнецов, Н. А. Чуян и др. Курск: Курский федеральный аграрный научный центр, 2022. 217 с.

26. Nutrient Recycling, Wheat Straw Decomposition, and the Potential Effect of Straw Shear Strength on Soil Mechanical Properties / Ya. Wang, A. Adnan, X. Wang, et al. // Agronomy. 2020. Vol. 10. No. 2. P. 314. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy10020314> (дата обращения: 10.02.2025). doi: 10.3390/agronomy10020314.

27. Демин Е. А., Миллер С. С., Ахтямова А. А. Влияние минеральных удобрений и температуры почвы на эмиссию углекислого газа в посевах яровой пшеницы в условиях лесостепной зоны Зауралья // Земледелие. 2024. № 1. С. 17–22. doi: 10.24412/0044-3913-2024-1-17-22.

28. Decomposition characteristics of rice straw returned to the soil in northeast China / Ch. Yan, Sh. Sh. Yan, T. Yu. Jia, et al. // Nutrient Cycling in Agroecosystems. 2019. Vol. 114. No. 3. P. 211–224. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10705-019-09999-8> (дата обращения: 10.02.2025). doi: 10.1007/s10705-019-09999-8.

29. Гамзиков Г. П., Сулейменов С. З. Азотминерализующая способность серой лесной почвы Новосибирского Приобья при компостировании и паровании растительных остатков // Почвоведение. 2021. № 5. С. 582–591. doi: 10.31857/S0032180X21050087.

30. Таксономический состав и организация микробного сообщества дерново-подзолистых почв после внесения соломы зерновых культур и использования препарата Баркон / О. В. Орлова, Е. Л. Чирак, Н. И. Воробьев и др. // Сельскохозяйственная биология. 2019. Т. 54. № 1. С. 47–64. doi: 10.15389/agrobiology.2019.1.47rus.

31. Plant Residues Decomposition and Formation of Active Organic Matter in the Soil of the Incubation Experiments / V. M. Semenov, N. B. Pautova, T. N. Lebedeva, et al. // Eurasian Soil Science. 2019. Vol. 52. No. 10. P. 1183–1194. doi: 10.1134/S1064229319100119

32. Humic acids: properties, structure, and application / A. Dauletbay, D. Hanzheng, A. N. Ongalbek, et al. // Bulletin of Shakarim University. Technical Sciences. 2024. No. 3 (15). P. 321–340. doi: 10.53360/2788-7995-2024-3(15)-41.

33. Бамбалов Н. Н. Изменение элементного состава лигнина в процессе гумификации // Почвоведение. 2011. № 10. С. 1193–1200.

34. Ильина Г. В., Ильин Д. Ю., Воробьева А. А. Влияние продуктов деградации лигнина на динамику комплекса мицелиальных грибов в модельных условиях // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Естественные науки. 2021. № 4 (36). С. 79–91. doi: 10.21685/2307-9150-2021-4-8.

Сведения об авторах:

Ерёмин Дмитрий Иванович – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геномных исследований в растениеводстве, e-mail: soil-tyumen@yandex.ru

Любимова Анна Валерьевна – кандидат биологических наук, зав. лабораторией геномных исследований в растениеводстве, e-mail: ostapenkoav88@yandex.ru

Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Северного Зауралья – филиал Федерального исследовательского центра Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук, пос. Московский, Тюменская обл., Россия.

EFFICIENCY OF AGROCHEMICALS USING TO ACCELERATE POST-HARVEST RESIDUES DECOMPOSITION OF SPRING WHEAT IN DARK-GRAY FOREST SOIL

D. I. Eremin, A. V. Lyubimova

Abstract. The study was conducted to determine the effectiveness of agrochemicals used to accelerate the decomposition of post-harvest residues of spring wheat in dark-gray forest soil. The study was conducted in 2023–2024 in a model experiment using composting of arable dark-gray forest soil. The experimental design involved composting spring wheat straw for 12 months under conditions optimal for the development of soil microbiota (temperature 20–22°C; soil moisture 60–70% of the maximum field capacity) with the addition of various agrochemicals. After 1, 2, 3, 6, 9 and 12 months, the straw was removed and the mass of non-mineralized residue, organic carbon content and total nitrogen were determined. The activities of invertase, polyphenol oxidase and peroxidase were determined to study the direction of decomposition process of post-harvest residues in the soil. In the absence of agrochemicals, spring wheat straw in dark gray forest soil does not undergo significant changes after 2 months of composting. Its reliable transformation occurs between 3rd and 12th months of exposure. The mass loss was 52% of the original; the carbon-to-nitrogen ratio decreased from 79 to 40 after one year of composting. The humification coefficient throughout the experiment was equal to 1.1...1.2, indicating the creation of optimal conditions for straw humification in dark gray forest soil. Treating straw with urea-ammonia mixture, the humic preparation Rostok, Mikrobionik stubble destructor and Biokompozit corrector accelerates the decomposition of spring wheat straw. The maximum effect in the experiment was observed with the combined use of KAS 32, the humic preparation and one of the biodestructors. Unmineralized residue was 29% after 12 months of composting. Spraying straw with nitrogen fertilizer and microbial-enzymatic biodestructors creates favorable conditions for its mineralization. The most effective acceleration of humification was achieved with the use of Rostok and its combination with biodestructors – the humification coefficient was in the range of 1.2–1.3.

Key words: humification coefficient, mineralization, biodestructors, straw decomposition, soil enzymatic activity, carbon-to-nitrogen ratio, composting, lignin.

References

1. Turusov VI, Konovalova EYa. [The role of residual crop biomass in regulating soil biological activity in crop rotation links in the south-east of the Central Black Earth region]. Plodorodie. 2024; 6 (141). 5–9 p. doi: 10.25680/S19948603.2024.141.01.
2. Bobrenko IA, Voronkova NA. Ispolzovanie solomy v zemledelii Zapadnoy Sibiri: rekomendatsii proizvodstvu. [Straw use in Western Siberian agriculture: recommendations for production]. Omsk: Omskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet imeni P.A. Stolypina. 2022; 24 p.
3. Riaz MW, Yousaf MI, Hussain Q. Role of lignin in wheat plant for the enhancement of resistance against lodging and biotic and abiotic stresses. [Internet]. Stresses. 2023; No.3. 434–453 p. [cited 2025, February 10]. Available from: <https://pdfs.semanticscholar.org/220d/c89f7430f335736584cbebad51260ede4d.pdf>. doi: 10.3390/stresses3020032.
4. Ninkuu V, Liu Zh, Qin A. Impact of straw returning on soil ecology and crop yield: a review. [Internet]. Heliyon. 2025; Vol.11. No.2. e41651 p. [cited 2025, February 10]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844025000313>. doi: 10.1016/j.heliyon.2025.e41651.
5. Demin EA, Miller SS. [Influence of different tillage methods and soil temperature on carbon dioxide emissions in spring wheat crops in the forest-steppe zone of the Trans-Urals]. Zemledelie. 2024; 4. 13–18 p. doi: 10.24412/0044-3913-2024-4-13-18.
6. Zavalin AA, Karashaeva AS, Khusaynov KhA. [On the issue of carbon emission and sequestration in agriculture of the Chechen Republic]. Agrokhimicheskiy vestnik. 2024; 1. 19–23 p. doi: 10.24412/1029-2551-2024-1-004.
7. Orlova OV, Andronov EE, Vorobev NI. Composition and functioning of microbial communities in the decomposition of straw cereals in sod podzolic soil. Agricultural Biology. 2015; Vol.50. No.3. 305–314. doi: 10.15389/agrobiology.2015.3.305rus.
8. Rusakova IV. [Efficiency of microbial destructors of post-harvest residues in laboratory and field experiments]. Vladimirskiy zemledelets. 2021; 2 (96). 34–40 p. doi: 10.24412/2225-2584-2021-2-34-40.
9. Grekhova IV, Litvinenko NV, Grekhova VYu. [Influence of the composition and doses of organic and mineral

- fertilizer on crop productivity]. *Vestnik KrasGAU*. 2021; 10 (175). 80-87 p. doi: 10.36718/1819-4036-2021-10-80-87.
10. Masyutenko NP, Kuznetsov AV, Masyutenko MN. [Influence of microbiological preparations and nitrogen application on the processes associated with the sequestration of organic carbon in typical slightly eroded chernozem]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2024; 1. 113-121 p. doi: 10.25750/1995-4301-2024-1-113-121.
11. Filimonenko EA, Uporova MA, Arbuzova EA. [Conversion of arable land into fallow land increases the stability of soil organic matter]. *Agrofizika*. 2023; 3. 9-16 p. doi: 10.25695/AGRP.2023.03.02.
12. Akhtyamova AA, Eremin DI. [Changes in the chemical composition of spring wheat straw using the humic preparation Rostok in the forest-steppe of Trans-Urals]. *Vestnik KrasGAU*. 2023; 4 (193). 58-65 p. doi: 10.36718/1819-4036-2023-4-58-65.
13. Eremin DI, Akhtyamova AA. [Regulation of the decomposition rate of plowed straw in the forest-steppe zone of Trans-Urals]. *Agroproduktovstvennaya politika Rossii*. 2016; 12 (60). 54-57 p.
14. Grekhova IV. [Humic preparation from lowland peat]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2015; 1. 87-90 p.
15. Khaziev FK. *Metody pochvennoy enzimologii*. [Methods of soil enzymology]. Moscow: Nauka. 2005; 256 p.
16. Kozlov AV. *Metody pochvennoy mikrobiologii i enzimologii v ekosistemnykh issledovaniyakh*. [Methods of soil microbiology and enzymology in ecosystem studies]. Moscow: Plodородie. 2023; 152 p.
17. Rizhiya EYa, Boytsova LV, Veretnyy VE. [Variability of polyphenol oxidase and peroxidase activity in agro-sod-podzolic soils of different cultivation levels with biochar]. *Selskokhozyaystvennaya biologiya*. 2022; Vol.57. 3. 476-485 p. doi: 10.15389/agrobiol.2022.3.476rus.
18. Bernard TNO, George SA, Firibu KS. Predictive modelling of peroxidase, polyphenol oxidase and catalase in post-harvest white trifoliolate (*D. Dumetorum* Var.) yam tubers. [Internet]. *Food Science & Nutrition Technology*. 2020; No.5 (6). 000237 p. [cited 2025, February 10]. Available from: <https://medwinpublishers.com/FSNT/predictive-modelling-of-peroxidase-polyphenol-oxidase-and-catalase-in-post-harvest-white-trifoliolate-d-dumetorum-var-yam-tubers.pdf>. doi: 10.23880/fsnt-16000237.
19. Makhnykina AV, Polosukhina DA, Koshurnikova NN. [Changes in soil CO₂ emissions in taiga ecosystems of Central Siberia: from daily to inter-seasonal dynamics]. *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: Sistemnyy analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem*. 2018; Vol.1. 3. 205-210 p. doi: 10.23885/2500-395x-2018-1-3-205-210.
20. Zorkina KA, Gorlova OP. [Influence of organic fertilizers' aftereffect on the state of mesobiota and some properties of soil in Krasnoyarsk forest-steppe zone]. *Vestnik KrasGAU*. 2017; 1(124). 138-143 p.
21. Shakhova OA. [Intensity of fiber decomposition on gray forest and chernozem soil using various primary tillage systems in the Northern Trans-Urals]. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2022; 5 (97). 9-13 p.
22. Maysyamova DR, Eremin DI. [Changes in the microflora of arable chernozem in the forest-steppe zone of the Trans-Urals under the influence of mechanical cultivation]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2020; 1 (183). 17-27 p.
23. Perfilov NV, Vyushina OA. [Biological activity of dark gray forest soil and barley yield depending on various primary tillage systems]. *Vestnik KrasGAU*. 2023; 7 (196). 3-11 p. doi: 10.36718/1819-4036-2023-7-3-11.
24. Sahab S, Suhani I, Singh RP. Valuing each patch of land: Utilizing plant-microbe interactions for the betterment of agriculture. [Internet]. *Microbes in Land Use Change Management*. 2021; 471-507 p. [cited 2025, February 10]. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128244487000292>. doi: 10.1016/B978-0-12-824448-7.00024-3.
25. Masyutenko NP, Kuznetsov AV, Chuyan NA. Vliyanie biopreparatov na pochvennoe organicheskoe veshchestvo, strukturnoe i biologicheskoe sostoyanie chernozema tipichnogo slaboerodirovannogo. [Effect of biopreparations on soil organic matter, structural and biological state of typical slightly eroded chernozem]. *Kursk: Kurskiy federalnyy agrarnyy nauchnyy tsentr*. 2022; 217 p.
26. Wang Ya, Adnan A, Wang X. Nutrient recycling, wheat straw decomposition, and the potential effect of straw shear strength on soil mechanical properties. [Internet]. *Agronomy*. 2020; Vol.10. No.2. 314 p. [cited 2025, February 10]. Available from: <https://doi.org/10.3390/agronomy10020314>. doi: 10.3390/agronomy10020314.
27. Demin EA, Miller SS, Akhtyamova AA. [Effect of mineral fertilizers and soil temperature on carbon dioxide emission in spring wheat crops in the forest-steppe zone of the Trans-Urals]. *Zemledelie*. 2024; 1. 17-22 p. doi: 10.24412/0044-3913-2024-1-17-22.
28. Yan Ch, Yan ShSh, Jia TYu. Decomposition characteristics of rice straw returned to the soil in northeast China. [Internet]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2019; Vol.114. No.3. 211-224 p. [cited 2025, February 10]. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10705-019-09999-8>. doi: 10.1007/s10705-019-09999-8.
29. Gamzikov GP, Suleymenov SZ. [Nitrogen-mineralizing capacity of gray forest soil of Novosibirsk Priobye region during composting and fallowing of plant residues]. *Pochvovedenie*. 2021; 5. 582-591 p. doi: 10.31857/S0032180X21050087.
30. Orlova OV, Chirak EL., Vorobev NI. [Taxonomic composition and organization of microbial community of sod-podzolic soil after the addition of cereal straw and use of Barkon preparation]. *Selskokhozyaystvennaya biologiya*. 2019; Vol.54. 1. 47-64 p. doi: 10.15389/agrobiol.2019.1.47rus.
31. Semenov VM, Pautova NB, Lebedeva TN. Plant residues decomposition and formation of active organic matter in the soil of the incubation experiments. *Eurasian Soil Science*. 2019; Vol.52. No.10. 1183-1194 p. doi: 10.1134/S1064229319100119
32. Dauletbay A, Hanzheng D, Ongalbek AN. Humic acids: properties, structure, and application. *Bulletin of Shakhkarim University. Technical Sciences*. 2024; No.3 (15). 321-340 p. doi: 10.53360/2788-7995-2024-3(15)-41.
33. Bambalov NN. [Changes in the elemental composition of lignin during humification]. *Pochvovedenie*. 2011; 10. 1193-1200 p.
34. Ilina GV, Ilin DYu, Vorobeva AA. [Effect of lignin degradation products on the dynamics of a filamentous fungal complex under model conditions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Estestvennye nauki*. 2021; 4 (36). 79-91 p. doi: 10.21685/2307-9150-2021-4-8.

Authors:

Eremin Dmitriy Ivanovich – Doctor of Biological Sciences, leading researcher of Laboratory of Genomic Research in Plant Growing, e-mail: soil-tyumen@yandex.ru
 Lyubimova Anna Valerevna – Ph.D. of Biological Sciences, Head of Laboratory of Genomic Research in Plant Growing, e-mail: soil-tyumen@yandex.ru
 Northern Urals Research Institute of Agriculture – branch of Federal Research Center of Tyumen Scientific Center of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Moskovskiy settlement, Tyumen region, Russia.