УДК 631.46:631.86 DOI: 10.25680/S19948603.2026.150.08

ЦЕЛЛЮЛОЗОЛИТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ

А.С. Карашаева[1], к.с.-х.н., А.А. Завалин[1], ак. РАН, А.В. Козлов[2], д.б.н.
[1]Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д.Н. Прянишникова
127434, Москва, ул. Прянишникова, 31а
[2]Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН
119991, Москва, ул. Косыгина, д. 19, стр. 1
e-mail: k.areza@mail.ru

Представлены результаты по влиянию длительного применения минеральной и органоминеральной систем удобрения на целлюлозолитическую активность дерново-подзолистой почвы в условиях Центрального Нечерноземья.

Установлено, что внесение минеральных удобрений увеличило аппликационную целлюлозолитическую активность под озимой пшеницей в 2,95 раза относительно контроля (с 5,18 до 15,30%), а применение органоминеральной системы в сочетании с микроэлементами и магнием – в 3,46 раза (до 17,92%). Различия между вариантами статистически недостоверны ($НСР_{05}$ = 8,83%), однако оба варианта достоверно превышают контроль. Под ячменём максимальное повышение целлюлозолитической активности составило 1,4 раза (с 11,79 до 16,49%), однако дисперсионный анализ не выявил статистически значимых различий между вариантами ($F = 0,94$, $p = 0,496$). При этом активность ферментов целлюлаз на фоне ОМС снижалась в 1,06-1,32 раза относительно контроля (на 6-24%), что объясняется механизмом катаболитной репрессии — временным подавлением синтеза энергозатратных ферментов в присутствии легкодоступного органического вещества сидерата. Разнонаправленность изменений, по-видимому, отражает метаболическую пластичность микробного сообщества, что согласуется с данными секвенирования 16S рРНК об отсутствии долговременных структурных перестроек микробиоценоза.

Ключевые слова: система удобрения, целлюлозолитическая активность, дерново-подзолистая почва, аппликационный метод, активность целлюлаз, сидерат.

Для цитирования: *Карашаева А.С., Завалин А.А., Козлов А.В.* Целлюлозолитическая активность дерново-подзолистой почвы при различных системах применения удобрений// Плодородие. – 2026. – №3. – С. 46-50. DOI: 10.25680/S19948603.2026.150.08.

Для понимания современного агрономического почвоведения необходимо глубоко изучить динамику функционирования почвенной микробиоты в условиях возрастающего антропогенного воздействия [1, 2]. Комплексное влияние таких факторов, как системы удобрения, севообороты и обработка почвы, приводит к изменениям в структуре и функционировании всех компонентов почвенных агроэкосистем.

В последние годы наблюдается значительный прогресс в осмыслении микробных механизмов деградации целлюлозы, что связано с внедрением молекулярно-биологических методов – от секвенирования 16S рРНК до полногеномного метасеквенирования и анализа углевод-активных ферментов [1].

В данном контексте аппликационные методы диагностики почв приобретают особую значимость, поскольку позволяют учитывать интегральное воздействие различных факторов и получать более глубокое понимание пространственно-временной динамики микробных сообществ. Так, по данным ряда авторов [2], применение органоминеральных систем удобрения способствует, как правило, более выраженному увеличению целлюлозолитической активности по сравнению с чисто минеральными системами. Это связано с комплексным воздействием органического вещества и питательных элементов, обеспечивающих более благоприятные условия для развития целлюлозолитических микроорганизмов. В то же время отмечается, что интенсивное применение минеральных удобрений может привести к временному снижению активности целлюлозолитического микробного комплекса из-за нарушения баланса питательных веществ или ингибирующего действия высоких концентраций солей. Однако, в зависимости от конкретных условий, даже минеральные удобрения могут стимулировать целлюлозолитическую активность почвы, особенно при внесении в оптимальных дозах и в сочетании с другими агротехническими приемами.

Одним из ключевых механизмов регуляции целлюлозолитической активности является катаболитная репрессия – эволюционно закреплённая стратегия микроорганизмов, при которой в присутствии легкодоступных источников углерода (например, простых сахаров из сидеральной массы) подавляется синтез энергозатратных ферментов, таких как целлюлазы [3]. Этот механизм обеспечивает метаболическую пластичность микробных сообществ, позволяя им быстро переключаться между разными субстратами в зависимости от их доступности.

В агроэкосистемах применение органических и органоминеральных удобрений оказывает значительное влияние на целлюлозолитическую активность почвы. Интеграция химических азотных удобрений с органическими (птичий помёт) и микробными удобрениями улучшает доступность азота, увеличивает микробную биомассу и активность целлюлаз, одновременно изменяя структуру микробного сообщества. Исследования на дерново-подзолистых и чернозёмных почвах показали, что формирование активного целлюлозолитического сообщества происходит в течение первых двух месяцев колонизации субстрата. При этом таксономический состав достигает стабильного состояния, специфичного для каждого типа почвы [4]. Интересно, что различия в целлюлозолитической активности между почвенными типами связаны не только с прямым действием микроорганизмов-деструкторов, но и с опосредованным влиянием представителей

высших трофических уровней, в частности нематод и хищных грибов [13, 14].

Особое внимание в последние годы уделяют дозам органических удобрений. Умеренное внесение органических удобрений способствует накоплению стабильных фракций органического углерода и повышению активности оксидаз, тогда как избыточное внесение может снижать эффективность микробной трансформации и увеличивать сложность микробных сетей, что ослабляет стабилизацию углерода [5]. Эти данные подчёркивают необходимость оптимизации доз удобрений для достижения баланса между продуктивностью культур и углерод-секвестрирующей функцией почвы.

Аппликационные методы диагностики, основанные на прямой инкубации целлюлозосодержащих индикаторов в почве (in situ), позволяют получить интегральную оценку деструкционной активности всего сапротрофного комплекса, включая микроорганизмы с различной субстратной специфичностью [18, 19]. В отличие от традиционных лабораторных анализов, эти методы учитывают комплексное влияние всех действующих факторов и дают более реалистичное представление о биохимической активности микроорганизмов в полевых условиях [6, 7]. Как отмечается [8], именно интегральная оценка, а не анализ отдельных компонентов дает более полное представление о реальной биохимической активности микроорганизмов в полевых условиях.

Однако остаётся ряд нерешённых вопросов. Во-первых, как соотносятся данные аппликационных методов (интегральная деструкционная активность) и прямого ферментативного анализа (специфическая активность целлюлаз) при разных системах удобрения? Во-вторых, в какой степени краткосрочные метаболические сдвиги, индуцированные внесением сидератов и удобрений, отражаются на таксономической структуре микробного сообщества? В-третьих, каков вклад различных групп микроорганизмов (бактерии и грибы, специализированные целлюлолитики и микроорганизмы с широкой субстратной специфичностью) в наблюдаемые изменения активности?

Цель исследований – дать сравнительную оценку влиянию длительного применения минеральной (МС) и органоминеральной (ОМС) систем удобрения на целлюлозолитическую активность дерново-подзолистой почвы в условиях полевого опыта и, как следствие, на ее биохимическую трансформацию почвенного безазотистого органического вещества.

Методика. Исследования проводили в 2022-2023 г. на базе длительного стационарного опыта СШ-2 ЦОС ВНИИА, расположенного в п. Шебанцево Домодедовского городского округа Московской области. Объект исследования – дерново-подзолистая тяжелосуглинистая почва длительного стационарного опыта с удобрениями.

Метеорологические условия вегетационного периода 2023 г. характеризовались пониженными температурами: средняя температура июня составила +19 °С, июля +24 °С (максимум) и +13 °С (минимум). Выпадение осадков в период прорастания и всходов позволило получить выравненные и полные всходы.

Почвенные образцы отбирали с трех полей севооборота: 1 – озимая пшеница (сорт Московская 56), 2 – сидерат (горчица белая), 3 – ячмень озимый (сорт Яромир). Площадь учетной делянки 25 м^2, повторность 4-кратная. Отбор образцов проводили методом конверта с глубины 0-20 см.

Агрохимическая характеристика почвы в период исследований: $pH_{сол.}$ 5,3-5,5, гидролитическая кислотность – 2,28-3,03 мг-экв/100 г, сумма поглощенных оснований – 11,2-12,2 мг-экв/100 г, содержание гумуса (по Тюрину) – 1,9-2,1%, подвижного фосфора (P_2O_5 по Чирикову) – 221-229 мг/кг, обменного калия (K_2O по Масловой) – 207-218 мг/кг, общего азота – 0,116%.

Схема опыта:

1. Контроль (без удобрений, с применением химических средств защиты растений – ХСЗР).
2. Фон 1 (МС) и ХСЗР + минеральные удобрения ($N_{120}P_{60}K_{120}$).
3. Фон 1 (МС) + Аквамикс-СТ.
4. Фон 1 (МС) + Аквамикс-СТ + Mg.
5. Фон 1 (МС) + Аквамикс-СТ + Mg + Карбамид + Зеребро-агро.
6. Фон 2 (ОМС) и ХСЗР + сидераты (горчица) + минеральные удобрения ($N_{120}P_{60}K_{120}$).
7. Фон 2 (ОМС) + Аквамикс-СТ.
8. Фон 2 (ОМС) + Аквамикс-СТ + Mg.
9. Фон 2 (ОМС) + Аквамикс-СТ + Mg + Карбамид + Зеребро-агро.

Оценку целлюлозолитической активности (ЦА) почвы проводили двумя методами: аппликационный весовой метод (*in situ*) по прямой интенсивности разложения льняного полотна и лабораторный аналитический метод определения биохимической активности выделенных из почвы ферментов целлюлаз в трансформации вводимого субстрата и замера концентрации образующихся продуктов ферментативной реакции [9,10].

В начале июня на каждой делянке закладывали шесть образцов предварительно взвешенного неотбеленного льняного полотна. Образцы помещали вертикально в почву, экранируя с одной стороны полиэтиленовой пленкой для создания градиента разложения. Через 30 дней их извлекали, отмывали, высушивали до воздушно-сухого состояния и взвешивали.

Лабораторную диагностику измерения биохимической работы почвенных целлюлаз и образования глюкозы проводили по [15, 16]. В качестве субстрата использовали натриевую соль карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ-Na), количество образовавшейся глюкозы определяли спектрофотометрическим методом.

Статистический анализ выполняли с использованием пакета Microsoft Excel («Анализ данных»). Для каждого варианта опыта рассчитывали среднее арифметическое по 6 повторностям. Оценку достоверности различий между вариантами проводили методом однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA). Для пшеницы дополнительно рассчитывали наименьшую существенную разность ($НСР_{05}$). Различия считались статистически достоверными при $p \leq 0,05$.

Результаты и их обсуждение. На рисунке 1 представлены данные по интенсивности разложения льняного полотна (аппликационная целлюлозолитическая активность) в дерново-подзолистой почве при возделывании озимой пшеницы и ячменя на фоне различных систем удобрения.

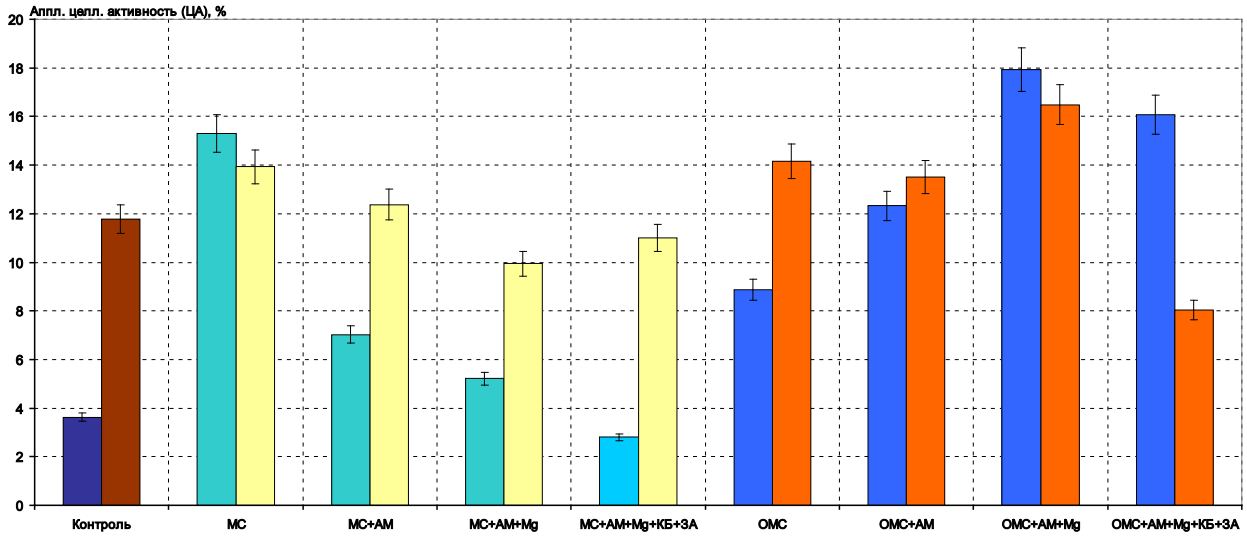

Рис.1. Изменение аппликационной целлюлозолитической активности почвы в условиях минеральной и органоминеральной систем удобрения озимой пшеницы и ячменя (один вариант содержит 2 столбца значений показателя, по порядку соответствующих опыту с озимой пшеницей и ячменем)

Внесение минеральных удобрений (МС, вар. 2) сопровождалось увеличением ЦА на 195% относительно контроля (с 5,18 до 15,30%). При использовании органоминеральной системы (ОМС, вар. 6) превышение контрольного уровня составило 71% (8,87%). Дополнительное применение биологических добавок (Аквамикс, Mg, карбамид, Зеребро-агро) на фоне ОМС приводило к дальнейшему повышению ЦА. Максимальное значение зафиксировано в варианте 8 (ОМС + Аквамикс-СТ + Mg) – 17,92%, что на 246% выше контроля и на 17% выше варианта 2 (МС). Различия между вариантами 2 и 8 статистически недостоверны (разница 2,62% при $НСР_{05}$ = 8,83%), однако оба варианта достоверно превышают контроль.

Под ячменём минеральная система увеличила ЦА на 18% относительно контроля (с 11,79 до 13,93%), органоминеральная система – на 20% (14,17%). В вариантах с биодобавками отмечен рост ЦА до 16,49% (вар. 8), что на 40% выше контроля. Согласно дисперсионному анализу, различия между вариантами по ячменю статистически недостоверны ($F = 0,94$; $p = 0,496$).

Различия в отклике между культурами частично обусловлены разной продолжительностью вегетационного периода и, как следствие, неодинаковым количеством корневых экссудатов, поступающих в ризосферу.

Важно подчеркнуть, что полученные значения ЦА отражают интегральную активность сапротрофного микробного комплекса в конкретный период вегетации. По данным параллельных молекулярно-биологических исследований (секвенирование 16S рРНК), через один вегетационный сезон после заделки сидерата таксономический состав прокариотного сообщества в вариантах с удобрениями статистически значимо не отличался от контроля [11]. Это позволяет предполагать, что наблюдаемые изменения ЦА носят преимущественно метаболический, а не структурный характер. Вместе с тем, следует учитывать, что метод секвенирования может не улавливать кратковременные сдвиги на уровне функционально активных филотипов или экспрессии генов, особенно в пиковые периоды разложения органического вещества. Поэтому отсутствие долговременных перестроек микробиоценоза не исключает временной активации отдельных таксономических групп в фазе активного метаболизма.

На рисунке 2 представлены данные по активности целлюлазы (АЦ) в почве под озимой пшеницей, ячменём и горчицей.

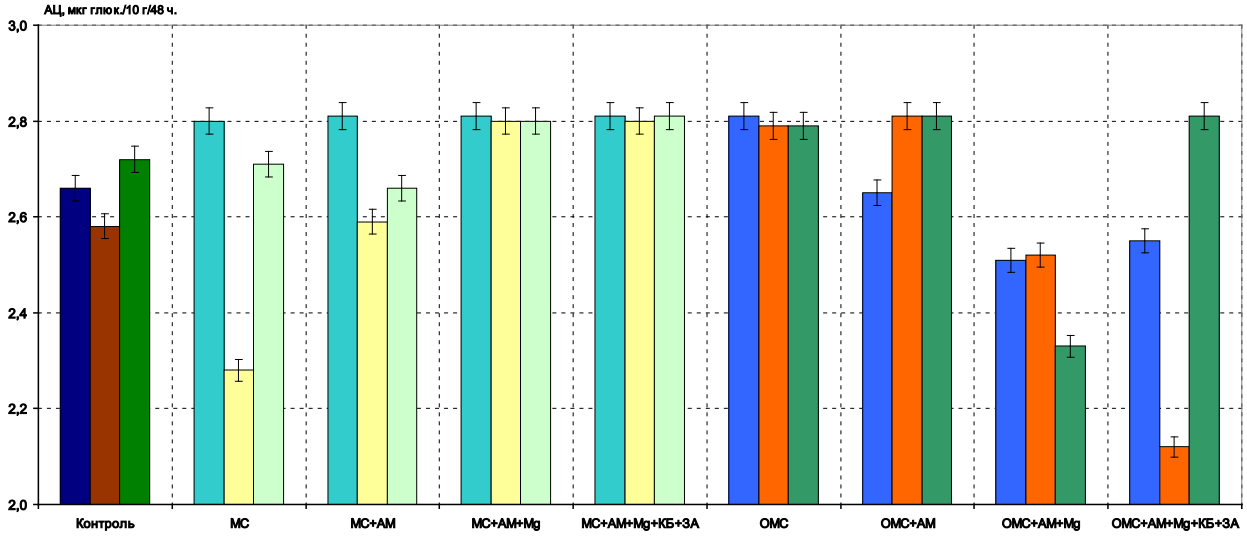

Рис. 2. Изменение активности целлюлазы почвы в условиях минеральной и органоминеральной систем удобрения озимой пшеницы, ячменя и горчицы (один вариант содержит 3 столбца значений показателя, по порядку соответствующих опыту с озимой пшеницей, ячменем и горчицей)

На фоне МС отмечено умеренное повышение АЦ – на 6-9% в зависимости от культуры по сравнению с контролем. На фоне ОМС наблюдалось снижение АЦ на 6-18% относительно контроля и на 17-24% относительно МС.

Снижение активности целлюлаз на фоне ОМС объясняется механизмом катаболитной репрессии – универсальным механизмом регуляции микробного метаболизма, при котором в присутствии легкодоступного источника углерода микроорганизмы подавляют синтез ферментов, необходимых для утилизации более сложных субстратов [24]. Внесение легкоусвояемых органических соединений из сидератов приводит к временному ингибированию синтеза энергозатратных целлюлаз.

На первый взгляд, данные аппликационного метода (рост ЦА) и лабораторного определения активности целлюлаз (снижение) могут показаться противоречивыми. Однако это отражение разных уровней организации микробного метаболизма. Аппликационный метод регистрирует суммарную деструкционную активность всего сапротрофного комплекса, включая амилолитические и протеолитические группы. Лабораторный метод специфичен именно для целлюлазного комплекса. Таким образом, одновременное увеличение общей деструкционной активности при снижении специфической целлюлазной активности указывает на переключение микробного метаболизма на использование более лабильных компонентов сидеральной массы. Это соответствует данным секвенирования 16S рРНК об отсутствии долговременных структурных изменений микробиоценоза [11].

Полученные разнонаправленные изменения согласуются с литературными данными [12].

При изучении влияния микробиологических удобрений на дерново-подзолистой почве установлено, что целлюлозолитическая активность возрастала на 330% по сравнению с контролем. Однако при этом отмечено снижение содержания азота в продукции картофеля, причём коэффициент корреляции между целлюлозолитической активностью и содержанием азота составил -0,97, что указывает на тесную обратную связь. Данный эффект объясняется конкурентными отношениями между активизированной почвенной микробиотой и растением за азот. Это согласуется с нашей интерпретацией, по которой рост суммарной деструкционной активности сапротрофного комплекса не обязательно сопровождается повышением активности строго специфичных ферментов, а может отражать переключение микробного метаболизма.

В исследованиях на дерново-подзолистой почве указывается, что целлюлозолитическая активность зависит от гидротермических условий вегетационного периода. В благоприятный по влажности и температуре год разложение целлюлозосодержащего субстрата происходило в 3 раза быстрее, чем в неблагоприятный, при этом различия между удобренными вариантами и контролем в неблагоприятный год нивелировались. Это объясняет полученные недостоверные различия между вариантами по ячменю ($F = 0,94$; $p = 0,496$) – вегетационный период 2023 г. характеризовался пониженными температурами, что могло сгладить эффект от систем удобрения.

Предложенное объяснение разнонаправленности аппликационной и ферментативной активности через механизм катаболитной репрессии является гипотетическим. Прямых доказательств переключения микробного метаболизма с целлюлозы на легкодоступные субстраты сидерата в данном исследовании не получено. Вместе с тем, не исключено, что снижение активности целлюлаз отражает временное угнетение специализированной микробной группы, тогда как рост разложения льняного полотна может обеспечиваться за счёт микроорганизмов с более широкой субстратной специфичностью (например, амилолитиков или протеолитиков). Окончательное решение вопроса требует совместного использования метагеномных методов (анализ экспрессии генов целлюлаз) и изотопных подходов для трассировки углерода. В связи с этим представленные результаты следует рассматривать как феноменологическое наблюдение, требующее дальнейшей верификации.

Выводы. Органоминеральная система удобрения в сочетании с микроэлементами (вар. 8) обеспечивает максимальное увеличение целлюлозолитической активности *in situ* как под озимой пшеницей (до 17,92%), так и под ячменём (до 16,49%).

По пшенице различия между вариантами МС и ОМС + Mg статистически недостоверны ($НСР_{05} = 8,83\%$), однако оба варианта достоверно превышают контроль. По ячменю дисперсионный анализ не выявил статистически значимых различий между вариантами ($p = 0,496$), но отмечена тенденция к повышению активности в варианте 8.

Снижение активности целлюлаз на фоне ОМС (6-24%) не свидетельствует о деградации микробного сообщества, а отражает его метаболическую пластичность (катаболитная репрессия), что согласуется с данными секвенирования 16S рРНК об отсутствии долговременных структурных изменений микробиоценоза.

Литература

1. *Kimeklis A.K., Gladkov G.V., Orlova O.V., et al.* Metagenomic insights into the development of microbial communities of straw and leaf composts // Frontiers in Microbiology. – 2024. – Vol. 15. – P. 1-12. – DOI: 10.1101/2024.07.08.602579.
2. *Гаврилова В.И., Герасимова М.И.* Целлюлозолитическая активность почв: методы измерения, факторы и эколого-географическая изменчивость // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 2019. – № 1. – С. 23-27.
3. *Gladkov G.V., Kimeklis A.K., Orlova O.V., et al.* Dynamics of cellulose degradation by soil microorganisms from two contrasting soil types // Microorganisms. – 2024. – Vol. 12. (8) – P. 1728. – DOI: org/10.3390/microorganisms12081728.
4. *Li J., Zhang Y., Wang X., et al.* Year-to-year variation in organic fertilization effects on soil carbon stabilization and microbial networks // Frontiers in Microbiology. – 2025. – Vol. 16. – P. 1-14.
5. *Козлов А.В.* Методы почвенной микробиологии и энзимологии в экосистемных исследованиях. – М.: ООО Плодородие. – 2023. – 152 с.
6. *López-Mondéjar R. et al.* Metagenomics and stable isotope probing reveal the complementary contribution of fungal and bacterial communities in the recycling of dead biomass in forest soil // Soil Biology and Biochemistry. – 2020. – Vol. 148. – P. 107875.
7. *Тихонович И.А., Завалин А.А.* Комплексное использование микробных препаратов и удобрений при развитии природоподобных технологий в земледелии // Вестник Российской академии наук. – 2025. — № 6. – С. 59-66.
8. *Домась А.С., Рахуба М.Г., Колядич М.А.* Целлюлозолитическая способность почв некоторых рекреационных территорий г. Бреста // Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию НИЛ экологии ландшафтов факультета географии и геоинформатики БГУ «Актуальные вопросы устойчивого природопользования: научно-методическое обеспечение и практическое решение». – Минск, 2022. – С. 73-76.
9. *Мишустин Е.Н.* Методы оценки биологической активности почвы // Почвоведение. – 1966. – № 5. – С. 45-58.
10. *Звягинцев Д.Г.* Биологическая активность почв и шкалы для оценки некоторых ее показателей // Почвоведение. — 1978. — № 6. — С. 48-54.
11. *Завалин А.А., Карашаева А.С., Старостина Е.Н., Зверев А.О.* Изменения микробного сообщества дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы при возделывании различных сельскохозяйственных культур // Российская сельскохозяйственная наука. – 2025. – № 3. – С. 35-39.

12. *Карпова А. Ю., Иудин В. А., Рудометова А. А.* Изменение биологической активности дерново-подзолистой почвы при применении микробиологических удобрений // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2025. – № 4. – С. 12-21.

UDC 631.46:631.86

THE STATE OF CELLULOLYTIC ACTIVITY OF SODDY-PODZOLIC SOIL UNDER DIFFERENT FERTILIZER APPLICATION SYSTEMS

Karashaeva A.S., Cand. Agr. Sci.[1], Zavalin A.A., Academician of the RAS[1],
Kozlov A.V., Dr. Biol. Sci.[2]
[1]Federal State Budgetary Institution the All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov, 127434, Moscow, Pryanishnikova St., 31a
[2]Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences, 119991, Moscow, Kosygina St., 19, bldg. 1
e-mail: k.areza@mail.ru

The article presents the results of the long-term application of mineral (MS) and organomineral (OMS) fertilizer systems on the cellulolytic activity of soddy-podzolic soil in the Central Non-Black soil region. The study was conducted in 2023 on the basis of a long-term stationary field experiment (SSh-2) at the Experimental Station of the All-Russian Research Institute of Agrochemistry named after D.N. Pryanishnikov (Shebantsevo village, Domodedovo urban district, Moscow oblast) during the cultivation of winter wheat, barley, and green manure (white mustard).

It was found that the application of mineral fertilizers increased the application-measured cellulolytic activity under winter wheat by 2.95 times relative to the control (from 5.18% to 15.30%), while the organomineral system combined with micronutrients and magnesium increased it by 3.46 times (up to 17.92%). Differences between the treatments were not statistically significant (LSD_{05} = 8.83%); however, both treatments were significantly higher than the control. Under barley, the maximum increase in the index was 1.4 times (from 11.79% to 16.49%); however, analysis of variance revealed no statistically significant differences between the treatments ($F = 0.94$; $p = 0.496$). At the same time, cellulase enzyme activity under OMS decreased by a factor of 1.06–1.32 relative to the control (by 6–24%), which is explained by the mechanism of catabolite repression — a temporary suppression of the synthesis of energy-costly enzymes in the presence of readily available organic matter from green manure. The multidirectional nature of the changes apparently reflects the metabolic plasticity of the microbial community, which is consistent with 16S rRNA sequencing data showing the absence of long-term structural rearrangements of the microbiocenosis.

Keywords: fertilizer system, cellulolytic activity, soddy-podzolic soil, application method, cellulase activity, green manure.