

УДК 631.417.2
МРНТИ 68.05.29
DOI 10.56525/DIKV2219

ВЕРМИКОПОСТИРОВАНИЕ КАК ФАКТОР ПОВЫШЕНИЯ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ПОЧВ: ОБЗОР

Тауова Н.

Атырауский университет имени Х.Досмухамедова, г. Атырау, Казахстан

e-mail: tauova76@mail.ru

Аннотация. Вермикомпостирование — это биотехнологический процесс аэробной переработки органических субстратов с участием дождевых червей и ассоциированных микробных сообществ, превращающийся из метода управления отходами в эффективный инструмент агроэкологического восстановления почв. Синтез данных последних исследований демонстрирует, что вермикомпост стабильно повышает биодоступность азота и фосфора, содержание органического вещества, микробную активность и продуктивность сельскохозяйственных культур. Основные механизмы включают ускорение минерализации питательных веществ, стимулирование фосфатсольбилизирующих и ростостимулирующих микробов, а также активацию гуминовых веществ, способствующих развитию корневой системы. Эффективность вермикомпостирования зависит от состава исходного субстрата, гранулометрии почвы, дозы и сроков внесения. Применение вермикомпоста повышает устойчивость растений к биотическому и абиотическому стрессу, снижая необходимость в синтетических удобрениях и пестицидах. Однако современная литература ограничена короткими временными интервалами исследований, отсутствием стандартизированных протоколов и недостаточным пониманием молекулярных механизмов «растение–почва». Для дальнейшего развития необходимы многолетние полевые испытания, интеграция функциональной геномики и разработка комплексных моделей жизненного цикла. Вермикомпостирование рассматривается как ключевой элемент устойчивого и регенеративного земледелия, способный одновременно улучшать плодородие почв, продуктивность культур и экологическую устойчивость агроэкосистем.

Ключевые слова: вермикомпост, дождевые черви, биодоступность азота, цикл фосфора, урожайность культур, почвенный органический углерод, агроэкология, устойчивое земледелие.

Введение

Ускоряющаяся деградация мировых почвенных ресурсов представляет одну из наиболее острых проблем устойчивого производства продовольствия. Традиционные стратегии внесения удобрений, будучи эффективными в краткосрочной перспективе, способствуют подкислению почвы, потере органического вещества и нарушению естественных циклов питательных элементов [8]. На этом фоне биологические почвенные улучшители привлекают всё большее научное внимание, а вермикомпостирование выдвигается в качестве особо перспективного подхода.

Вермикомпостирование представляет собой аэробную биоконверсию органических субстратов посредством совместного действия дождевых червей (преимущественно *Eisenia fetida* и *Lumbricus rubellus*) и ассоциированных микробных сообществ. Получаемый продукт — вермикомпост — характеризуется узким соотношением C:N, высокой биологической активностью и повышенными концентрациями доступных для растений питательных веществ [15]. Первый метаанализ влияния вермикомпоста [2], охвативший данные 79 экспериментов, подтвердил статистически значимое повышение урожайности и улучшение показателей качества почвы в широком диапазоне условий.

Несмотря на стремительный рост публикаций, область остаётся концептуально фрагментированной. Большинство исследований оценивают изолированные параметры, не интегрируя их в согласованные агроэкологические модели продуктивности. Настоящий обзор устраняет этот пробел посредством критического синтеза актуальных данных по (i) динамике питательных веществ и биогеохимической реконфигурации, (ii) продуктивности культур и сигнальным механизмам системы «растение–почва», а также определяет методологические ограничения и направления для будущих исследований.

Динамика питательных веществ и биогеохимическая реконфигурация Биодоступность азота и фосфора

К числу наиболее стабильно воспроизводимых эффектов вермикомпостирования относится повышение биодоступности макроэлементов. Метаанализ [6], охватывающий 79 экспериментальных наблюдений, показал, что внесение вермикомпоста увеличивает содержание доступного азота в среднем на 133,8%, а доступного фосфора — на 256,7% относительно контроля (Рисунок 1). Эти приросты объясняются двойным действием кишечного пассажа через дождевого червя — ускоряющего фрагментацию органического вещества — и стимулированной микробной минерализацией органических пулов азота и фосфора.

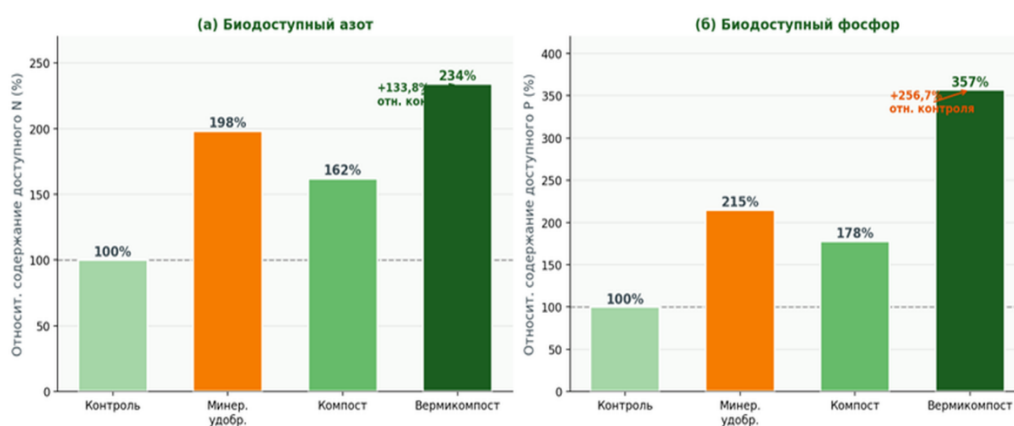


Рисунок 1. Влияние вермикомпоста на биодоступность N и P (метаанализ, 79 наблюдений) [6]

Особого внимания заслуживает роль фосфатсольбилизирующих бактерий (ФСБ) в вермикомпосте. Yattoo et al. [15] показали, что популяции ФСБ значительно обогащены в вермикомпосте по сравнению с термофильным компостом, что способствует мобилизации нерастворимых фракций неорганического фосфора. Это особенно актуально для почв с высокой фосфор-фиксирующей способностью, где традиционные минеральные фосфатные удобрения демонстрируют низкую агрономическую эффективность.

Повышение концентрации нитратов после внесения вермикомпоста традиционно связывают с усилением нитрификации. Исследование Wu et al. [13], выполненное в условиях теплиц, установило, что совместное применение биоугля и вермикомпоста позволяет синхронизировать высвобождение питательных веществ с потребностями культур и минимизировать потери на вымывание.

Состав субстрата и профиль микроэлементов

Эффективность вермикомпостирования существенно ограничивается биохимическим составом исходного сырья. Субстраты, богатые лигнином, — такие как растительные остатки и древесные материалы — демонстрируют замедленную кинетику стабилизации по сравнению с азотсодержащими субстратами. В исследовании Hanc, Dume & Hrebekova [5], посвящённом вермикомпостированию осадка сточных вод с соломенными гранулами, установлено, что ферментативная активность падает наиболее резко в начальной фазе

(Рисунок 4), тогда как биологическая стабилизация достигается лишь по завершении длительной обработки.

Nabiyaremye et al. [4] сообщили, что вермикомпост из коровьего навоза и осадка сточных вод существенно различается по содержанию калия, железа и цинка, что влечёт различия в эффективности поглощения этих элементов культурами. Полученные данные подчёркивают, что вермикомпост нельзя рассматривать как однородный улучшитель.

Динамика почвенных агрегатов и стабилизация органического азота

Исследование фракций почвенных агрегатов Scientific Reports [11] показало, что внесение вермикомпоста предотвращало деградацию органического азота в мелких агрегатных фракциях. Доля макроагрегатов возросла с 38 до 52%, а потери растворимого азота снизились с 27 до 12% (Рисунок 2). Этот эффект стабилизации может снижать уязвимость к потерям азота в результате денитрификации в анаэробных условиях.

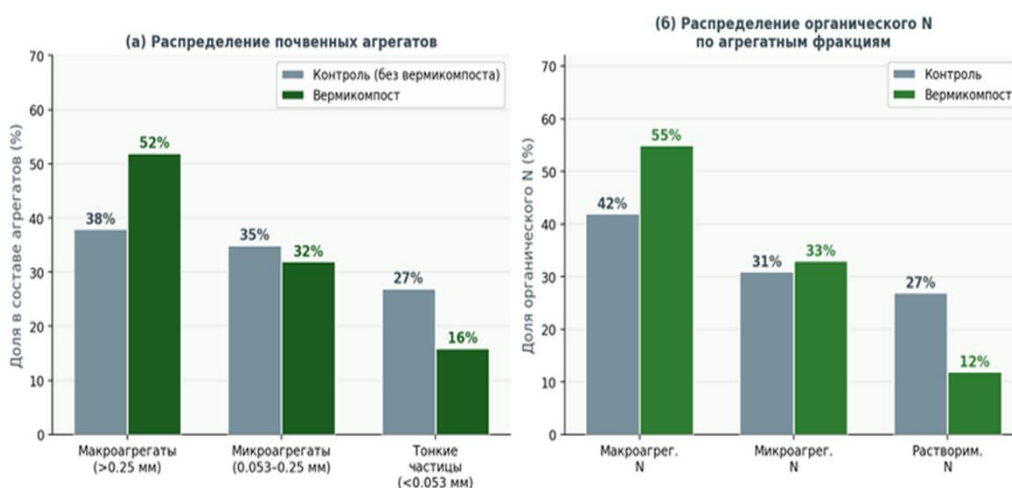


Рисунок 2. Влияние вермикомпоста на структуру почвенных агрегатов и стабилизацию органического азота [8,11]

Продуктивность культур и механизмы стимуляции роста растений

Метаанализ приростов урожайности

Положительный эффект вермикомпоста на продуктивность культур является одним из наиболее устойчивых результатов в литературе. Первый комплексный метаанализ Aira et al. [2] зафиксировал средние приросты коммерческого урожая на 26%, надземной биомассы — на 78%, корневой биомассы — на 57%, причём пиковые эффекты достигались при дозе вермикомпоста 30–50% объёма субстрата (Рисунок 3).

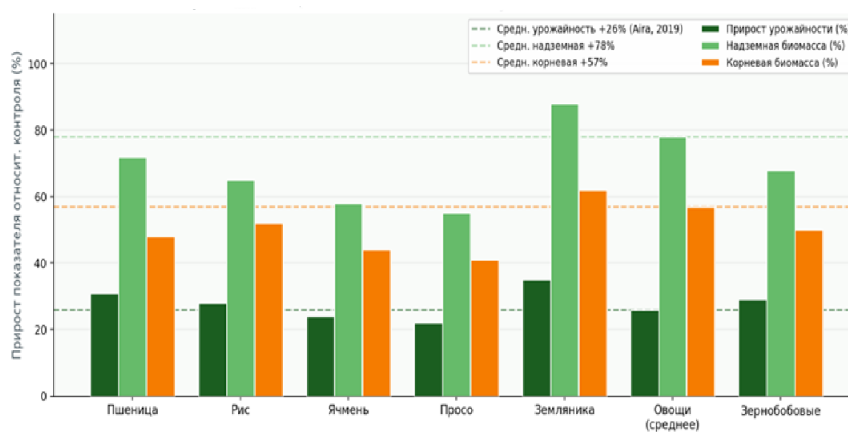


Рисунок 3. Влияние вермикомпоста на урожайность и биомассу сельскохозяйственных культур [2,8]

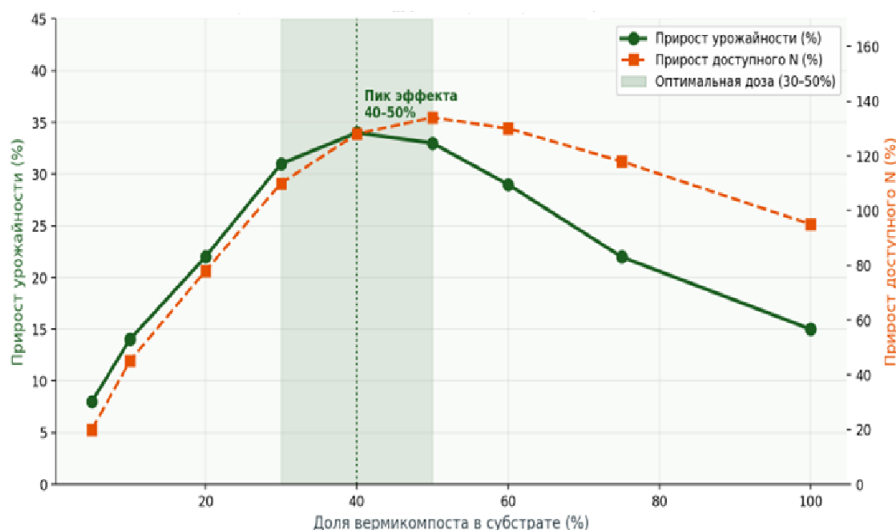


Рисунок 4. Зависимость агрономического эффекта от дозы вермикомпоста (синтез данных: [2])

Применительно к зерновым культурам Mulatu & Bayata [8] обобщили данные, свидетельствующие о том, что вермикомпост повышает урожайность риса, пшеницы, ячменя и проса посредством двух основных механизмов: прямого повышения эффективности поглощения питательных веществ и косвенного улучшения фотосинтетической способности за счёт улучшенного азотного статуса листьев.

Для садово-огородных культур полевой опыт Nabiyaermye et al. [4] по выращиванию земляники показал, что на делянках с вермикомпостом были получены достоверно более высокие урожай плодов, содержание растворимых сухих веществ и концентрация антоцианов по сравнению с контролем на минеральных удобрениях.

Биохимические и микробные механизмы

На биохимическом уровне гуминовые вещества — основная фракция органического вещества вермикомпоста — стимулируют развитие корневой системы, модулируя активность H^+ -АТФазы плазматической мембраны [15]. На микробном уровне вермикомпост привносит и поддерживает популяции ризобактерий, стимулирующих рост растений (PGPR), — включая азотфиксирующие *Azospirillum* и *Azotobacter*, фосфатсольбилизирующие бактерии и сидерофорпродуцирующие микроорганизмы [7]. Сводная схема механизмов представлена на Рисунке 5.



Рисунок 5. Механизмы действия вермикомпоста на систему «почва–растение» (синтез) [8,15]

Подавление патогенов и индуцированная системная резистентность

Одним из наиболее практически значимых аспектов применения вермикомпоста является его способность подавлять почвенные фитопатогены и индуцировать системную резистентность растений-хозяев. Yatoo et al. [14] обобщили данные, свидетельствующие о том, что вермикомпост стабильно подавляет популяции *Fusarium*, *Pythium*, *Phytophthora* и *Rhizoctonia* — основных возбудителей корневых гнилей и болезней выпревания (Рисунок 6).

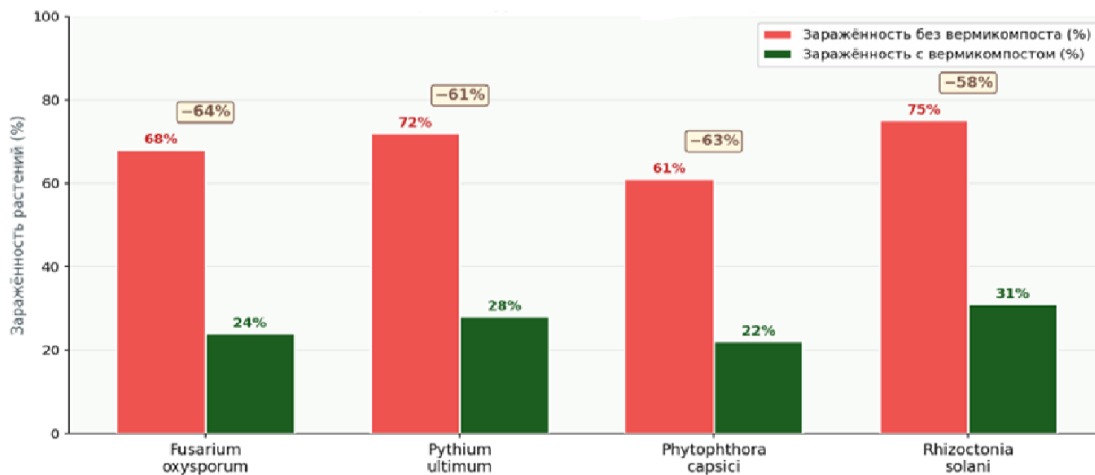


Рисунок 6. Подавление почвенных фитопатогенов при внесении вермикомпоста (синтез данны) [14]

Принципиально важно, что индуцированная системная резистентность (ИСР), вызываемая PGPR вермикомпоста, является системной, устойчивой и не сопровождается потерями приспособленности в отсутствие патогенного воздействия [14]. Это свойство делает вермикомпост особенно привлекательным инструментом интегрированной защиты растений в органических системах земледелия.

Ферментативная активность и динамика микробного сообщества

Динамика ферментативной активности в процессе вермикомпостирования, изученная Hanc, Dume & Hrebeckova [5] на модели осадка сточных вод, свидетельствует о максимальном снижении активности на начальной фазе с последующей стабилизацией (Рисунок 7). Актинобактерии — обогащённые в вермикомпосте относительно термофильного компоста — являются известными деструкторами рекальцитрантных углеродных соединений, включая целлюлозу и лигнин, и могут создавать прайминг-эффект.

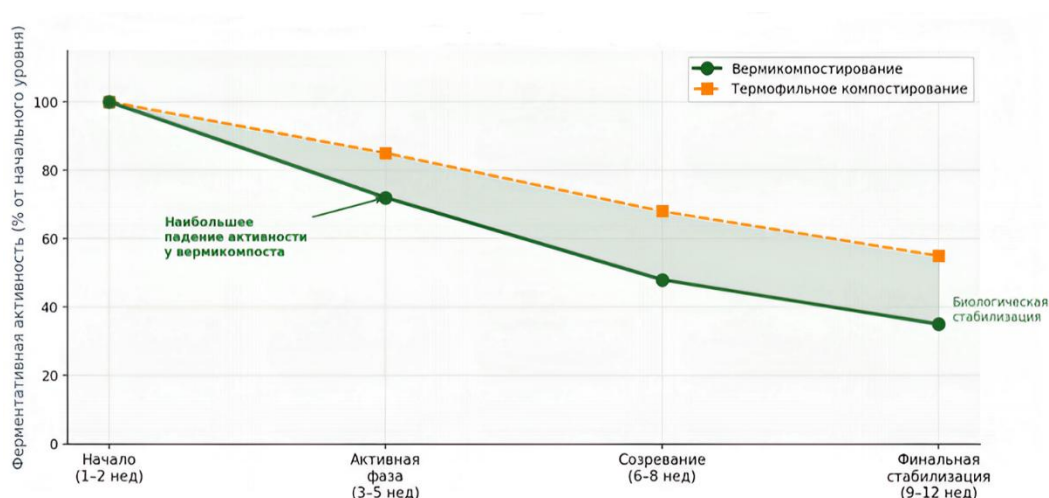


Рисунок 7. Динамика ферментативной активности при вермикомпостировании и термофильном компостировании [5]

Эмиссии парниковых газов и LCA-оценка

Фреймворки оценки жизненного цикла (LCA), интегрирующие транспортную логистику, затраты энергии на переработку и полевые эмиссии (N_2O , CH_4), применяются крайне редко. Систематический обзор Raza et al. [9] показал, что вермикомпостирование снижает эмиссию N_2O на 35% и NH_3 на 28% по сравнению с термофильным компостированием (Рисунок 8). Обогащение вермикомпоста биоуглём или активными микробными культурами дополнительно снижает эмиссию на 55–62%.

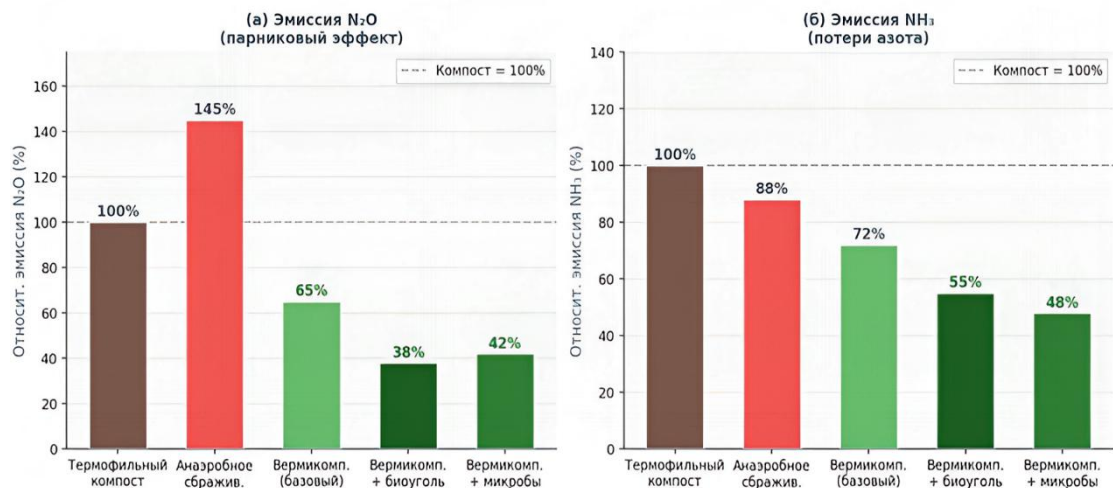


Рисунок 8. Эмиссия парниковых газов (N_2O) и аммиака (NH_3) при разных методах компостирования [9]

Выводы и перспективы исследований

Проведённый синтез выявил ряд структурных ограничений в современной литературе, сдерживающих как научный прогресс, так и практическое внедрение:

1. Временной охват большинства испытаний недостаточен для выявления кумулятивных и пороговых эффектов. Необходимы многолетние полевые испытания продолжительностью более 3–5 лет.
2. Отсутствие стандартизированных протоколов характеристики вермикомпоста серьёзно ограничивает межисследовательские сравнения.
3. Механистическое понимание путей передачи сигналов в системе «растение–почва» остаётся неполным; транскриптомные и метаболомные подходы представляют приоритетное направление.
4. LCA-фреймворки, интегрирующие транспортную логистику и полевые эмиссии, применяются крайне редко; без них нетто-климатическая польза от вермикомпоста не может быть надёжно количественно оценена [9].

Заключение

Вермикомпостирование представляет собой биологически обоснованную и агрономически эффективную стратегию повышения почвенной продуктивности. Рассмотренные данные подтверждают, что внесение вермикомпоста стабильно улучшает биодоступность азота (+133,8%) и фосфора (+256,7%), стимулирует микробные сообщества, способствующие росту растений, подавляет почвенные фитопатогены и обеспечивает приросты урожайности 22–35% в разнообразных системах возделывания культур при оптимальной дозе 30–50% объёма субстрата.

Область нуждается в переходе от редуccionистских исследований к интегрированным экспериментальным дизайнам, одновременно охватывающим биогеохимические, микробиологические и агрономические результаты на протяжении нескольких вегетационных сезонов. Лишь через такую междисциплинарную конвергенцию вермикомпостирование

может быть строго позиционировано как краеугольный камень климатически устойчивых продовольственных систем.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ahmad, A., Aslam, Z., Naz, M., Hussain, S., Ajeed, M., Arif, M., ... Wakeel, A. (2022). Rice straw vermicompost enriched with cellulolytic microbes ameliorate the negative effect of drought in wheat through modulating the morpho-physiological attributes. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 840280. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.840280>
2. Aira, M., Domínguez, J., & Crandall, K. A. (2019). Vermicompost significantly affects plant growth: A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(3), 34. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0579-x>
3. Enhancing sustainable crop production through integrated nutrient management: A focus on vermicompost, bio-enriched rock phosphate, and inorganic fertilisers — a systematic review. (2024). *Frontiers in Agronomy*, 6, 1422876. <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1422876>
4. Habiyaremye, J. de D., Tong, Y., Mugabo, J., Mugiraneza, T., Mu, J., & Munyaneza, F. (2024). Effects of cattle manure and sludge vermicompost on nutrient dynamics and yield in strawberry cultivation. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1514675. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1514675>
5. Hanc, A., Dume, B., & Hrebeckova, T. (2022). Differences of enzymatic activity during composting and vermicomposting of sewage sludge mixed with straw pellets. *Frontiers in Microbiology*, 12, 801107. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.801107>
6. Ma, H., Zhao, S., Hou, J., Lv, J., Li, X., Sun, X., ... Cui, Z. (2022). Vermicompost improves physicochemical properties of growing medium and promotes plant growth: A meta-analysis. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22, 3745–3755. <https://doi.org/10.1007/s42729-022-00924-7>
7. Mohite, D. D., Chavan, S. S., Jadhav, V. S., Mahulikar, P. P., Chaudhari, G. N., & Barvkar, V. T. (2024). Vermicomposting: A holistic approach for sustainable crop production, nutrient-rich bio-fertilizer, and environmental restoration. *Discover Sustainability*, 5, 60. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00245-y>
8. Mulatu, G., & Bayata, A. (2024). Vermicompost as organic amendment: Effects on some soil physical, biological properties and crops performance on acidic soil: A review. *Frontiers in Environmental Microbiology*, 10(4), 66–73. <https://doi.org/10.11648/j.fem.20241004.11>
9. Raza, S. T., Wu, J., Ali, Z., Eash, N. S., Bhatt, R., Datta, R., ... Saeed, Q. (2022). Effects of vermicompost preparation and application on waste recycling, NH₃, and N₂O emissions: A systematic review. *Bioresource Technology Reports*, 19, 101220. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101220>
10. Restoring soil functionality in drylands: Soil texture-specific impacts of vermicompost as an organic waste-based amendment. (2025). *Journal of Arid Environments*, 228, 105276. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2025.105276>
11. Soil aggregate and organic nitrogen distributions as influenced by vermicompost application in vegetable greenhouse. (2025). *Scientific Reports*, 15, 18492. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-06286-1>
12. Vermicomposting with microbial amendment: Implications for bioremediation of industrial and agricultural waste. (2022). *Acta Biochimica Polonica*, 69(4), 851–866. https://doi.org/10.18388/abp.2021_6539
13. Wu, Q., Zhang, J., Liu, X., Chang, T., Wang, Q., Shaghaleh, H., & Alhaj Hamoud, Y. (2022). Effects of biochar and vermicompost on microorganisms and enzymatic activities in greenhouse soil. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1060277. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1060277>
14. Yattoo, A. M., Ali, M. N., Baba, Z. A., & Hassan, B. (2021). Sustainable management of diseases and pests in crops by vermicompost and vermicompost tea: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(4), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00657-w>

15. Yattoo, A. M., Baba, Z. A., Ahmad Rather, M., Hilal Ahmad, B., Alam, S., Amin, Z., ... Ali, M. N. (2023). Vermicompost: Enhancing plant growth and combating abiotic and biotic stress. *Agronomy*, 13(4), 1134. <https://doi.org/10.3390/agronomy13041134>

ВЕРМИКОМПОСТТАУ – ТОПЫРАҚТЫҢ АГРОЭКОЛОГИЯЛЫҚ ӨНІМДІЛІГІН АРТТЫРУДАҒЫ ФАКТОР: ШОЛУ

Тауова Н.

Х.Досмухамедов университеті, Атырау қ., Қазақстан
e-mail: tauova76@mail.ru

Аңдатпа. Вермикомпосттау — бұл жаңбыр құрттар мен оларға қатысты микробтық қауымдастықтардың қатысуымен органикалық субстраттарды аэробты өңдеудің биотехнологиялық процесі, ол қалдықтарды басқару әдісінен агроэкологиялық топырақты қалпына келтірудің тиімді құралына айналуға. Соңғы зерттеулердің мәліметтері көрсеткендей, вермикомпост азот пен фосфордың биожетімділігін, органикалық заттардың мөлшерін, микробтық белсенділікті және ауыл шаруашылығы дақылдарының өнімділігін тұрақты түрде арттырады. Негізгі механизмдерге қоректік заттардың минерализациясын жеделдету, фосфатты ерітетін және өсімдікті ынталандыратын микробтарды стимуляциялау, сондай-ақ түбір жүйесінің дамуына ықпал ететін гуминді заттарды белсендіру кіреді. Вермикомпосттаудың тиімділігі бастапқы субстраттың құрамына, топырақтың дөңдік құрамына, енгізу мөлшеріне және мерзімдеріне байланысты. Вермикомпостты қолдану өсімдіктердің биотикалық және абиотикалық стресске төзімділігін арттырады, синтетикалық тыңайтқыштар мен пестицидтерді қолдану қажеттілігін азайтады. Алайда қазіргі әдебиет қысқа мерзімді зерттеулермен шектелген, стандартталған протоколдардың жоқтығы және «өсімдік–топырақ» жүйесінің молекулалық механизмдерін жеткілікті түсінбеушілік тән. Болашақта ұзақ мерзімді егістік тәжірибелерін жүргізу, функционалды геномиканы интеграциялау және өмірлік циклдің кешенді модельдерін әзірлеу қажет. Вермикомпосттау тұрақты және регенеративті ауыл шаруашылығында топырақ құнарлылығын, дақылдардың өнімділігін және агроэкожүйелердің экологиялық тұрақтылығын бір мезгілде жақсарту алатын негізгі құрал ретінде қарастырылады.

Түйін сөздер: вермикомпост, құмырсқалар, азоттың биожетімділігі, фосфор циклі, дақылдардың өнімділігі, топырақ органикалық көміртегі, агроэкология, тұрақты ауыл шаруашылығы.

VERMICOMPOSTING AS A FACTOR IN ENHANCING AGROECOLOGICAL SOIL PRODUCTIVITY: A REVIEW

Tauova N.

Atyrau University named after Kh. Dosmukhamedov, Atyrau, Kazakhstan
e-mail: tauova76@mail.ru

Abstract. Vermicomposting is a biotechnological process of aerobic decomposition of organic substrates involving earthworms and associated microbial communities, evolving from a waste management method into an effective tool for agroecological soil restoration. A synthesis of recent studies demonstrates that vermicompost consistently enhances the bioavailability of nitrogen and phosphorus, soil organic matter content, microbial activity, and crop productivity. Key mechanisms include accelerated nutrient mineralization, stimulation of phosphate-solubilizing and growth-promoting microbes, and activation of humic substances that support root system development. The effectiveness of vermicomposting depends on the composition of the initial

substrate, soil texture, application rate, and timing. Application of vermicompost increases plant resistance to biotic and abiotic stresses, reducing the need for synthetic fertilizers and pesticides. However, current literature is limited by short-term studies, lack of standardized characterization protocols, and insufficient understanding of the molecular mechanisms within the “plant–soil” system. Future research requires long-term field trials, integration of functional genomics, and development of comprehensive life-cycle models. Vermicomposting is considered a key component of sustainable and regenerative agriculture, capable of simultaneously improving soil fertility, crop productivity, and the ecological resilience of agroecosystems.

Keywords: vermicompost, earthworms, nitrogen bioavailability, phosphorus cycle, crop yield, soil organic carbon, agroecology, sustainable agriculture.