DOI 10.66073/ReFocus-Conf/3010133

НАУЧНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ ОРГАНОМИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ОСНОВЕ САПРОПЕЛЕЙ С УЧЁТОМ УГЛЕРОДНО-АЗОТНОГО БАЛАНСА, ГУМУСОВОГО СОСТАВА И МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

Исаев Г.Я., Мамасалиева Лазиза Э., Мячина О.В., Пулатов Б.А., Ибрагимова М.Р.

Институт общей и неорганической химии АН РУз

Аннотация: В данной работе приведены результаты процессов компостирования, где в качестве исходного сырья рассматривается сапропель рыбных хозяйств Сырдарьинской и Хорезмской областей. В ходе исследований наблюдаются процессы трансформации органического вещества (ОВ) этих компонентов в гуминовые соединения с различными C/N.

Найдено, что с увеличением соотношения сапропеля к навозу, и срока выдержки 1-150 суток привело к повышению степени гумификации и снижению потери веществ в газовую фазу. Определены оптимальные условия компостирования: Сапропель: Навоз равной 70:30 и срок созревания 90 суток.

Ключевые слова: Органо-минеральное удобрение, сапропель, навоз, компостирование, трансформация органического вещества, гумификация

Annotatsiya: Ushbu maqolada Sirdaryo va Xorazm viloyatlaridagi baliqchilik xo‘jaliklaridan olingan sapropeldan asosiy xomashyo sifatida foydalangan holda kompostlash jarayonlari natijalari keltirilgan. Tadqiqotda ushbu tarkibiy qismlardagi organik moddalarning (OM) C/N nisbati turlicha bo‘lgan gumusli birikmalarga aylanish jarayoni o‘rganilgan. Aniqlanishicha, sapropelning go‘ngga nisbatini oshirish hamda 1–150 kun davomida yetiltirish jarayoni gumuslanish darajasining ortishiga va moddalarning gaz fazasiga yo‘qolishining kamayishiga olib keladi. Kompostlash uchun eng maqbul sharoitlar sifatida sapropelning go‘ngga nisbati 70:30 bo‘lishi hamda yetiltirish davri 90 kunni tashkil etishi belgilandi.

Kalit so‘zlar: organik-mineral o‘g‘it, sapropel, go‘ng, kompostlash, organik moddalarning o‘zgarishi, gumifikatsiya

Abstract: This paper presents the results of composting processes using sapropel from fish farms in the Syrdarya and Khorezm regions as a primary feedstock. The research examines the transformation of organic matter (OM) from these components into humic compounds with varying C/N ratios. It was found that increasing the ratio of sapropel to manure, combined with a maturation period of 1–150 days, led to a higher degree of humification and reduced loss of material to the gas phase. The optimal composting conditions were determined to be a sapropel-to-manure ratio of 70:30 and a maturation period of 90 days.

Keywords: organic-mineral fertilizer, sapropel, manure, composting, transformation of organic matter, humification

Сапропели представляют собой природную органоминеральную основу для удобрений, сочетающих питательное и почвоулучшающее действие. Их ценность определяется происхождением органического вещества, гумусовыми фракциями и минеральным составом. K. Stankevica и соавт. [1] на материале пяти озёр Латвии показали,

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ
Исаев Г.Я., Мамасалиева Л.Э., Мячина О.В., Пулатов Б.А. и др. Научные предпосылки разработки органоминеральных удобрений на основе сапропелей с учётом углеродно-азотного баланса, гумусового состава и микробиологической активности // Состояние и перспективы развития фундаментальной и прикладной микробиологии: точка зрения молодых учёных: материалы Республиканской научно-практической конференции. ...
DOI: https://doi.org/10.66073/ReFocus-Conf/3010133

что содержание гуминовых веществ существенно зависит от типа сапропеля. Разработка твёрдых и жидких удобрений на сапропелевой основе, описанная L. Agafonova и соавт. [2], подтверждает возможность технологической переработки сырья. Однако для компостируемых композиций необходимо учитывать взаимосвязь химического состава с микробным преобразованием органического вещества.

Углеродно-азотный баланс определяет обеспеченность микроорганизмов энергетическим и азотным субстратами. Для исходной смеси при аэробном компостировании распространённым ориентиром служит C:N около 25–30:1 [3, 6]. Метаанализ B. Shen и соавт. [6], включивший 192 исследования, подтверждает значение этого диапазона, одновременно выявляя различия между видами сырья. При избытке доступного углерода недостаток азота замедляет разложение; при недостатке углерода относительно азота возрастает риск накопления аммонийных форм и потерь аммиака. Следовательно, подбор соотношения сапропеля, навоза и растительных добавок должен опираться на анализ компонентов, а не только на их массовые доли.

При оценке готового удобрения следует отличать оптимум компостирования от условий его действия в почве. Для зрелых компостов практическим ориентиром является C:N порядка 10–20:1; Clemson University указывает диапазон 10–15:1 [3]. Более широкое отношение, особенно выше 25–30:1 при наличии легкоразлагаемого углерода, повышает риск временного связывания почвенного азота микробной биомассой. Вместе с тем одно значение C:N не определяет удобрительную эффективность: важны устойчивость органического вещества и содержание доступного азота. Для карбонатных сапропелей необходимо отдельно учитывать органический углерод. Добавление минерального азота может арифметически сузить C:N, не обеспечивая биологической зрелости продукта; её следует подтверждать самостоятельными показателями.

Гумусовый состав характеризует способность сапропелевой основы удерживать элементы питания и участвовать в формировании почвенной структуры. Гуминовые кислоты (ГК) и гумины связаны со стабилизацией органического вещества и катионообменными свойствами, а более растворимые фульвокислоты (ФК) участвуют в комплексообразовании и переносе элементов [1]. Поэтому существенны содержание обеих кислотных фракций на сухое вещество и отношение их углерода С(ГК)/С(ФК). Универсального оптимума ГК:ФК для всех сапропелевых удобрений нет. По данным S. M. Tiquia [5], динамика гуминовых фракций связана с микробными показателями компостирования. Для доказательства накопления ГК и ФК необходимо учитывать убыль сухой массы, поскольку увеличение их процентного содержания может частично отражать концентрирование при минерализации других компонентов.

Микробиологические свойства исходного сапропеля определяют его участие в совместном компостировании, однако должны оцениваться применительно к аэробным условиям процесса. G. Isayev и соавт. [4] обнаружили в сапропеле Сырдарьинской области культивируемую бактериальную и актиномицетную микрофлору. На мясопептонном агаре численность составляла $1{,}06\times10^5$ КОЕ/г в исходном сапропеле, $7{,}61\times10^5$ КОЕ/г в навозе и $7{,}20\times10^5$ КОЕ/г в зрелом компосте при соотношении сапропель:навоз 70:30. Эти результаты подтверждают присутствие жизнеспособной микрофлоры, но сами по себе не доказывают скорость разложения, видовую принадлежность или полезные функции всех обнаруженных микроорганизмов.

Для отбора сапропелей, предназначенных для компостирования, целесообразно сочетать посевы на питательные среды с измерением дыхания и ферментативной активности. Исследование S. M. Tiquia [5] показало информативность потребления кислорода, дегидрогеназной активности и микробной биомассы при оценке гумификации и зрелости компоста. При разработке сапропелевых смесей такие показатели следует отслеживать вместе с температурой, влажностью и аэрацией. Высокая активность полезна на стадии разложения, тогда как её снижение при созревании необходимо отличать от подавления

DOI: 10.66073/ReFocus-Conf/3010133

микрофлоры неблагоприятными условиями. Вывод о зрелости надёжнее делать по совокупности биологической стабильности, химических показателей и отсутствия фитотоксичности.

В мировой научно-технической литературе имеются сведения о получении органических удобрений (ОУ), ОМУ, стимуляторов роста растений и других агрохимических средств, позволяющих повысить плодородие и обеспечить рекультивацию деградированных почв, а также получение высокого и качественного урожая. Однако нет сведений по использованию донных отложений с низким содержанием органического вещества (менее 20%) и высоким минеральным составом для получения на их основе ОМУ методом совместного компостирования сапропелей (СП) с навозом (НЗ), пшеничной соломой и минеральными солями, не изучены процессы трансформации (гумификации и минерализации), а также их состав и свойства.

Целью данных исследований являлась разработка ресурсосберегающей технологии получения ОМУ на основе сапропелей, органических отходов и минеральных компонентов, определение питательных и пролонгированных свойств, полученных ОМУ, оценка их влияния на плодородие почвы, а также развитие и урожайность сельскохозяйственных растений.

В задачи наших исследований входило изучение состава, физико-химических и физико-механических свойств сапропелей из водоемов рыбных хозяйств Сырдарьинского и Хорезмского вилоятов; исследование степени гумификации органического вещества в зависимости от массовых соотношений компонентов компостирования, с различными показателями C/N и времени компостирования; а исследование агрохимической эффективности удобрений и экологической безопасности их применения.

Объектом исследования являются сапропели 2 водных источников рыбных хозяйств «Gayrat fayzli dalasi» Сырдарьинской области (СП-С), «Yangiboy boyovulli» Хорезмской области (СП-Х), продукты компостирования, навоз КРС, солома пшеничная.

Процесс компостирования изучался при различных массовых соотношениях СП и НЗ = от 90:10 до 10:90 с различными соотношениями C / N. С целью уравновешивания ОВ в СП была использована солома пшеницы (СО). Компостирование проводилось в условиях аэробного режима при комнатной температуре (25 °C) в течение 150 суток инкубации. Учитывая влагоудерживающие свойства сапропеля, в смеси дополнительно добавляли воду для достижения оптимальной влажности в пределах 30-50 %, необходимой для протекания процессов гумификации ОВ. Отбор проб для анализа химического состава проводили каждые 15 суток. В качестве вариантов сравнения был также изучен процесс компостирования исходного сырья - сапропеля и навоза по отдельности. В образцах сапропеля и навоза КРС, а также в компостах после 150 дней компостирования определяли общую численность гетеротрофных микроорганизмов методом серийных десятикратных разведений и чашечного посева.

Следует отметить, что данная работа была выполнена в рамках плана научно-исследовательских работ Института общей и неорганической химии «Новые полифункциональные гуминовые удобрения: агрохимическая и агроэкологическая оценка, разработка научно-практических рекомендаций по применению», и содержит большой объем научных результатов. Однако в данной статье будет приведена лишь часть полученных результатов, затрагивающих разработки органоминеральных удобрений на основе сапропелей с учётом углеродно-азотного баланса, гумусового состава и микробиологической активности.

Как показали исследования, снижение массовой доли сапропеля и увеличение количества навоза количество углерода, азота, органического вещества (ОВ), гуминовых кислот (ГК) и фульвокислот (ФК), водорастворимых органических веществ (ВОВ) при компостировании, соотношение углерода к азоту увеличиваются. При этом с увеличением сроков инкубации, через 15 суток, наблюдается снижение органического вещества, а с

DOI: 10.66073/ReFocus-Conf/3010133

другой стороны, повышение содержания ГК и ФК, ВОВ. Так при использовании сапропелей из Сырдарьинской области (СП-С) к навозу (НЗ) при соотношении 90:10 и 10: 90 после 1 сутки ОУ содержит ОВ, ГУ, ФК, ВОВ в порядке 16,17; 1,85; 1,91, 1,80% и 45,45; 5,20; 5,38; 5,08% соответственно, то через 15 суток эти показатели достигают 15,86; 1,97; 2,03; 1,92% и 45,04; 5,32; 5,51; 5,08%. Такая же закономерность наблюдается с увеличением продолжительности от 30 до 150-суток, что для ОВ, ГУ, ФК, ВОВ варьируются от 15,57; 2,08; 2,15; 2,03% и 44,85; 5,43; 5,62; 5,30% до 14,82; 2,43; 2,51; 2,37% и 44,17; 5,83; 6,03; 5,69 % соответственно для СП-С: НЗ =90: 10 и 10: 90. В случае применения сапропеля из Хорезмской области (СП-Х), где количество ОВ, ГУ, ФК, ВОВ варьируют от 21,35; 3,06; 3,16; 3,00% и 47,44; 6,25; 6,47; 6,10% до 19,24; 4,04; 4,16; 3,93% и 42,86; 7,23; 7,46; 7,04 % соответственно при указанных сутках и соотношений СП-К: НЗ.

Кроме того исследованиями было выявлено, что с увеличением соотношений СП-С: НЗ повышается степень гумификации и снижение потерь газовой фракции. Однако с увеличением массовой доли навоза по отношению к сапропелю наблюдается снижение степени гумификации (СГ). Независимо от массового соотношения СП:НЗ повышение продолжительности сроков компостирования способствует увеличению степени гумификации. Например, при СП-С: НЗ = 90: 10 и СП-С: НЗ = 10: 90 СГ увеличивается от 37,72 до 49,32% и от 35,30 до 39,73% соответственно от 15 до 150 суток компостирования. Однако снижаются потери в газовой фракции от 1,82 до 1,71 и от 3,43 до 3,31% соответственно при указанных условиях. Что касается СП-К: НЗ = 90: 10 и СП-К: НЗ = 10: 90 степень гумификации увеличивается от 38,46 до 63,04% и от 36,90 до 50,70% соответственно от 15 до 150 суток компостирования.

Результаты микробиологического анализа экспериментальных вариантов выявили принципиальные различия в численности и структуре микробных сообществ, что напрямую определяет направленность процессов трансформации органического вещества. Как показали исследования по численности и качественному составу микрофлоры в варианте с НЗ содержится в 7 раз больше жизнеспособных микроорганизмов, чем в варианте СП-С. Такой высокий титр микрофлоры в НЗ обусловлен внесением лабильного органического вещества, служащего легкодоступным источником питания и энергии для гетеротрофов. Однако ключевые различия кроются не только в количестве, но и в качественном составе микробиома, так в варианте НЗ, микрофлора данного объекта преимущественно представлена спорообразующими бактериями рода *Bacillus*. Эти микроорганизмы обладают мощным набором экзоферментов, способных стремительно расщеплять белки, простые углеводы и аминокислоты. Тогда как в вариантах с СП, напротив, зафиксирована существенно более высокая доля актиномицетов (лучистых грибов). Как известно, актиномицеты развиваются медленнее бактерий, но играют незаменимую роль на более поздних стадиях деструкции, так как способны разрушать труднорастворимые и устойчивые полимеры (хитин, лигнин, целлюлозу).

Разница в архитектонике микробного ценоза предопределяет противоположную биохимическую направленность процессов в компостах. Быстрая минерализация в варианте с НЗ происходит за счёт доминирования бактерий рода *Bacillus* обеспечивая при этом бурную и быструю минерализацию субстрата. Так происходит активный распад органических соединений до конечных продуктов (углекислого газа, воды, аммиака), что приводит к быстрому высвобождению доступных для растений элементов питания (азота, фосфора, калия). Однако интенсивная минерализация сопряжена с риском повышенных газообразных потерь азота и углерода. Тогда как стабилизация процессов гумификации в вариантах с применением высокого содержания сапропеля и соломы в сочетании с активностью актиномицетов замедляет деструкцию. Мы считаем, что данный вариант обеспечивает стабилизацию и гумификацию органического вещества. Медленная ферментация лигноцеллюлозных остатков соломы и специфических гуминовых комплексов

DOI: 10.66073/ReFocus-Conf/3010133

сапропеля способствует процессам ресинтеза — формированию новообразованных зрелых гуминовых и фульвокислот.

Таким образом, по проведенным исследованиям можно сделать следующее заключение: увеличение массовой доли сапропеля и продолжительности компостирования способствует повышению степени гумификации и накоплению гуминовых и фульвокислот при одновременном снижении содержания органического вещества вследствие его трансформации. Установлено, что сапропель Хорезмской области обладает более высоким потенциалом гумификации по сравнению с сапропелем Сырдарьинской области. Микробиологический анализ выявил, что преобладание бактерий рода *Bacillus* в навозе способствует интенсивной минерализации органических соединений, тогда как высокая доля актиномицетов в сапропеле обеспечивает более медленное разложение устойчивых органических компонентов и способствует их гумификации. Таким образом, применение сапропеля в сочетании с навозом позволяет регулировать процессы минерализации и гумификации, повышать устойчивость органического вещества и снижать газообразные потери углерода и азота.

Список литературы

1. Stankevica K., Vincevica-Gaile Z., Klavins M. Role of humic substances in agriculture and variability of their content in freshwater lake sapropel // Agronomy Research. 2019. Vol. 17(3). P. 850–861. DOI: 10.15159/AR.19.094.
2. Agafonova L. et al. New Kinds of Sapropel and Peat Based Fertilizers // Environment. Technology. Resources. 2015. Vol. 2. P. 20–26. DOI: 10.17770/etr2015vol2.271.
3. Clemson University Agricultural Service Laboratory. Compost Interpretations — Lab Guidelines. https://www.clemson.edu/public/regulatory/ag-srvc-lab/animal-waste/compost/lab-guidelines.html (дата обращения: 15.10.2026).
4. Isayev G., Myachina O., Kim R. et al. An innovative co-composting approach for fish-farm sapropel and cattle manure: Humification dynamics and initial agrochemical properties // Journal of Ecological Engineering. 2026. Vol. 27(8). P. 387–398. DOI: 10.12911/22998993/220982.
5. Tiquia S. M. Microbiological parameters as indicators of compost maturity // Journal of Applied Microbiology. 2005. Vol. 99(4). P. 816–828. DOI: 10.1111/j.1365-2672.2005.02673.x.
6. Shen B., Zheng L., Zheng X. et al. Insights from meta-analysis on carbon to nitrogen ratios in aerobic composting of agricultural residues // Bioresource Technology. 2024. Vol. 413. Article 131416. DOI: 10.1016/j.biortech.2024.131416.