

Сәкен Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университетінің Ғылым жаршысы: пәнаралық = Вестник науки Казахского агротехнического исследовательского университета имени Сакена Сейфуллина: междисциплинарный. – Астана: С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу университеті, 2025. -№ 2 (125). - Р. 219-232. - ISSN 2710-3757, ISSN 2079-939X

doi.org/ 10.51452/kazatu.2025.2(125).1978

УДК 631.863

Исследовательская статья

Использование карбонизированных осадков сточных вод в качестве минерального удобрения: экологические и агрономические аспекты

Хасен Ж.М.² , Казанкапова М.К.^{1,2,3} , Ермағамбет Б.Т.^{1,2,3} , Касенова Ж.М.^{1,2,3} ,
Бейсембаева К.А.¹ , Акимбеков Н.Ш.⁴ , Тастамбек К.Т.⁴ , Тауанов Ж.Т.⁴ ,
Алдыңгурова Ф.Ж.⁵ , Малғаждарова А.Б.^{1,2} , Акшекина Ә.С.¹ 

¹ТОО «Институт химии угля и технологии», Астана, Казахстан,

²Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан,

³Казахский университет технологии и бизнеса им. К.Кулажанова, Астана, Казахстан,

⁴НИИ «Устойчивости экологии и биоресурсов», КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

⁵ГКП на ПХВ «Астана су арнасы» акимата города Астана, Астана, Казахстан

Автор-корреспондент: Хасен Ж.М.: zh.khassen@nurorda.edu.kz, coaltech@bk.ru

Соавторы: (1: МК) maira_1986@mail.ru; (2: БЕ) bake.yer@mail.ru;

(3: ЖК) zhanar_k_68@mail.ru; (4: КБ) beisembaeva64@mail.ru; (5: НА); akimbeknur@gmail.com;

(6: КТ) kuanysh.tastambek@kaznu.edu.kz; (7: ЖТ); tauanov.zhandos@kaznu.kz;

(8: ФА) firyuza.ald@gmail.com; (9: АМ) malgazhdarova.ab@mail.ru;

(10: ӘА) akshekina11@gmail.com

Получено: 30-04-2025 **Принято:** 23-06-2025 **Опубликовано:** 30-06-2025

Аннотация

Предпосылки и цель. В условиях растущей потребности в устойчивых сельскохозяйственных технологиях проведено исследование возможности вторичного использования илового осадка сточных вод, подвергнутого пиролизу, в качестве удобрения. Целью работы было выявление оптимальных температур карбонизации илового осадка для получения безопасного и эффективного продукта, способствующего росту растений.

Материалы и методы. В качестве модели использовалась микрозелень рукколы (*Eruca sativa*), благодаря ее быстрой реакции на изменения условий среды. Подготовлены образцы почвы с различным содержанием карбонизированного осадка (10-30%), обработанного при 350-700 °С, и применены шесть режимов полива, включая гумат калия.

Результаты. Результаты эксперимента показали, что наиболее благоприятное влияние на рост растений оказывает осадок, карбонизированный при 700 °С: отмечено ускоренное прорастание, удлинение ростков и повышение урожайности. Это связано с детоксикацией материала и сохранением питательных веществ в процессе термической обработки.

Закключение. Исследование подчеркивает потенциал карбонизированного ила как экологически обоснованной альтернативы традиционным удобрениям и его вклад в развитие циркулярной экономики.

Ключевые слова: иловый осадок; карбонизация; пиролиз; устойчивое сельское хозяйство; эффективное управление отходами; агроэкология.

Введение

Вопросы очистки сточных вод и утилизации образующегося илового осадка остаются актуальными и недостаточно решенными в большинстве крупных городов, включая столицу Казахстана – Астану. Иловые осадки представляют собой осадки сточных вод (ОСВ), образующиеся на очистных сооружениях в процессе механической, биологической и физико-

химической очистки воды. Эти осадки состоят преимущественно из органических (до 80%) и минеральных (около 20%) примесей [1]. На территории стран СНГ иловые осадки часто просто складываются на открытых площадках без дополнительной переработки. Такой метод утилизации требует значительных территорий, создает биологическую и токсикологическую угрозу и способствует загрязнению окружающей среды [2]. Таким образом, проблемы утилизации осадков требуют внедрения новых технологий, способных снизить нагрузку на окружающую среду и повысить экологическую безопасность. Разработка эффективной технологии переработки и использования ОСВ является не только экологически, но и экономически значимой задачей для многих городов республики [3, 4].

На сегодняшний день широко применяемыми методами утилизации ОСВ являются аэробное и анаэробное компостирование, сжигание, пиролиз и газификация [5]. Дополнительно, из-за отсутствия азота и углерода в золе требуется внесение дополнительных удобрений, что ограничивает её прямое использование в сельском хозяйстве [6]. В Европе сжигание ОСВ практикуется достаточно широко, что объясняется высокой эффективностью метода в сокращении объемов иловых осадков. Исследования показывают, что зола содержит фосфор и магний, что делает её потенциальным источником удобрений для сельского хозяйства, однако её прямое использование требует контроля содержания тяжелых металлов. Анализ золы, взятой из различных регионов, показал, что она содержит ценные элементы, такие как фосфор (P), кальций (Ca), магний (Mg), сера (S), а также микроэлементы [7].

Применение концепции циркулярной экономики (ЦЭ) в переработке ОСВ представляет собой важную стратегию устойчивого развития, направленную на создание замкнутых циклов использования материалов, минимизацию отходов и снижение загрязнений окружающей среды. ЦЭ подразумевает переработку и повторное использование ресурсов, таких как фосфор, содержащийся в ОСВ, что особенно актуально в условиях глобального дефицита удобрений. Это направление нашло поддержку в ряде стран, однако внедрение ЦЭ требует значительных инвестиций в технологии, что становится основным барьером [8].

Сжигание как метод утилизации осадков может быть обоснованно подвергнуто критике, так как при этом теряются агрономически полезные компоненты, что снижает ценность оставшейся золы как удобрения [9]. Одним из эффективных альтернативных подходов к переработке ОСВ является его карбонизация (пиролиз) в контролируемой атмосфере азота. Этот процесс позволяет сохранить такие питательные элементы, как фосфор, калий и кальций, которые могут быть использованы в качестве удобрений [10].

Как показывают исследования, пиролиз ОСВ при температурах 550-700 °C способствует значительной концентрации фосфора и калия в получаемом биокарбоне, делая его пригодным для дальнейшего использования в качестве минерального удобрения. В отличие от традиционного сжигания, этот метод позволяет минимизировать потери ценных элементов и повысить их доступность для растений [11]. Кроме того, пиролиз ОСВ в атмосфере азота, по сравнению с другими методами переработки, обладает значительными преимуществами: он снижает количество вредных соединений, минимизирует содержание летучих элементов и делает осадки более безопасными для окружающей среды [12].

В рамках данного исследования предлагается рассмотреть использование обезвоженного осадка сточных вод города Астана, подверженного карбонизации в атмосфере азота, в качестве удобрения. Это исследование предполагает оценку агрономических свойств продукта карбонизации, включая его влияние на качество почвы, уровень содержания питательных веществ и безопасность для окружающей среды. В случае успешной реализации метод может значительно сократить объемы отходов и улучшить экологическую обстановку, а также способствовать развитию ресурсосберегающих технологий, что является важной задачей в условиях современных изменений климата и нарастающей потребности в продуктах питания.

Материалы и методы

Методика получения карбонизированного илового осадка. Проба обезвоженного илового осадка сточных вод была отобрана на Канализационных очистных сооружениях «ГКП на ПХВ «Астана Су Арнасы». Состав проб обезвоженного осадка сточных вод приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики обезвоженного осадка

Наименование	Ед. измерения	Минимальная концентрация	Максимальная концентрация
Органическое вещество (гумус)	%	20,3	29,3
Водородный показатель, рН	Единицы рН	6,18	6,69
Органический углерод	г/кг	29,8	53,1
Коли-титр	г	не обнаружено	
Титр анаэробов (Сl. Perfigens)	г	не обнаружено	
Цинк	мг/кг	11,3	20,3
Калий водорастворимый	мг/кг	2,4	8,5
Кремний	мг/кг	12,3	82,3
Железо	мг/кг	1425,0	3012,3
Медь	мг/кг	25,6	52,3
Азот общий	%	0,8	3,8
Валовый фосфор	мг/кг	11,6	24,1

Иловый осадок предварительно высушивают в течении двух недель естественным способом на открытом воздухе. Для получения карбонизированного ила, высушенный осадок измельчают до фракций 1-3 см. Затем происходит карбонизация пробы при температурах 550 °С и 700 °С для удаления легколетучих компонентов и получения крупнопористой структуры. Карбонизация – это процесс термической обработки органического материала в инертной атмосфере, в результате которого происходит термическое разложение органических соединений с образованием твердого углеродистого остатка – карбонизата. В данном исследовании процесс карбонизации осуществлялся с использованием пиролизной печи, что было направлено на сохранение питательных веществ и снижение токсичности осадка.

Первым этапом получения илового осадка является сушка, проводится при 180 °С со скоростью 10 °С/мин нагрева в течение 1 ч в атмосфере воздуха. Далее карбонизация образцов проводилась в инертной среде (азот) при температурах 550 °С и 700 °С со скоростью 5 °С/мин.

Эксперименты по карбонизации илового осадка проводят на опытно-лабораторной высокотемпературной вращающейся печи BR-12NRT (рисунок 1).



Рисунок 1 – Лабораторная роторная вращающаяся высокотемпературная печь BR-12NRT для процесса карбонизации и активации

Методика подготовки почвы и поливной воды к высадке семян. Для исследования использовали готовый грунт и две пробы карбонизированного илового осадка полученные при разных температурах пиролиза.

Таблица 2 – Содержание питательных веществ в почве, мг/л

Азот (сумма аммонийного, нитратного и амидного азота)	не менее 180
Фосфор (в пересчете на P_2O_5)	не менее 290
Калий (в пересчете на K_2O)	не менее 330
Показатель кислотности в солевой среде (pH HCl)	5,4-6,6

Были приготовлены семь различных образцов почвы:

1. Образец №1: готовый грунт в чистом виде (100%).
2. Образец №2: готовый грунт, смешанный с карбонизированным илом (полученным при температуре 550 °С) в соотношении 90:10.
3. Образец №3: готовый грунт, смешанный с карбонизированным илом (полученным при температуре 550 °С) в соотношении 80:20.
4. Образец №4: готовый грунт, смешанный с карбонизированным илом (полученным при температуре 550 °С) в соотношении 70:30.
5. Образец №5: готовый грунт, смешанный с карбонизированным илом (полученным при температуре 700 °С) в соотношении 90:10.
6. Образец №6: готовый грунт, смешанный с карбонизированным илом (полученным при температуре 700 °С) в соотношении 80:20.
7. Образец №7: готовый грунт, смешанный с карбонизированным илом (полученным при температуре 700 °С) в соотношении 70:30.

Для исследования влияния поливной воды были использованы четыре вида растворов: водопроводная вода, раствор гумата калия с концентрацией 0,1%, смесь водопроводной воды и карбонизированного илового осадка, а также смесь раствора гумата калия с концентрацией 0,1% и карбонизированного илового осадка. Были приготовлены шесть различных растворов для полива семян:

1. Раствор №1: чистая водопроводная вода.
2. Раствор №2: смесь водопроводной воды и 10 г карбонизированного илового осадка (полученным при температуре 550 °С), общий объем 1 л.
3. Раствор №3: смесь водопроводной воды и 10 г карбонизированного илового осадка (полученным при температуре 700 °С), общий объем 1 л.
4. Раствор №4: раствор гумата калия с концентрацией 0,1%.
5. Раствор №5: смесь раствор гумата калия с концентрацией 0,1% и 10 г карбонизированного илового осадка (полученным при температуре 550 °С), общий объем 1 л.
6. Раствор №6: смесь раствор гумата калия с концентрацией 0,1% и 10 г карбонизированного илового осадка (полученным при температуре 700 °С), общий объем 1 л.

Методика проведения испытания с семенами. Для анализа влияния карбонизированного илового осадка на рост растений была использована руккола (микрорезель) в качестве тестовой культуры. Руккола была выбрана из-за своей быстроты роста, а также способности активно реагировать на изменения условий выращивания, включая состав удобрений. В эксперименте использовались различные образцы почвы, которые обрабатывались различными поливными растворами. Это позволило оценить влияние разных типов поливной воды и удобрений на развитие растений. Период первой фазы от всходов до уборки составляет 7-10 дней.

1. Высадка семян: Семена были посажены в почву, увлажнены поливными растворами.
2. Уход за почвой: Влажность почвы поддерживалась на оптимальном уровне, особенно на солнце. При подсыхании почва увлажнялась с помощью сеялки.
3. Наблюдение за ростом: Записывались данные о появлении первых ростков, количество проросших семян, рост растений измеряли линейкой.
4. Заключение: Подготовка заключения по результатам исследования.

Химический анализ и морфологию поверхности изучали методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии с использованием прибора SEM (Quanta 3D 200i) с приставкой для энергодисперсионного анализа фирмы EDAX. Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) - это тип электронного микроскопа, который создает изображения образца путем сканирования

поверхности сфокусированным лучом. Полученные изображения позволяют увидеть морфологию поверхности образца.

Результаты и обсуждение

Полученные летучие вещества после карбонизации садка были исследованы на хроматографе Кристалл-Люкс. Газовая смесь начинает гореть с 300 °С до 550 °С, говоря о наличии водорода в составе смеси. Данное наблюдение подтверждается результатами газовой хроматографии (таблица 3).

Таблица 3 – Газовый состав карбонизации илового осадка сточных вод

Т, °С	Газовый состав, %			
	N ₂	H ₂	O ₂	CO ₂
200	75,82	0,00	24,14	0,04
300	19,89	60,36	19,75	0,00
400	58,57	25,33	16,10	0,00
500	67,93	23,88	8,13	0,06
550	79,86	0,28	16,99	2,87
600	97,86	0,00	0,10	2,04
700	77,88	0,21	20,80	1,11

Составлен материальный баланс процесса карбонизации илового осадка при различных температурах, который представлен в таблицах 4 и 5.

Таблица 4 – Материальный баланс карбонизации илового осадка сточных вод (550 °С)

Входящие продукты	г	%	Исходящие продукты	г	%
Ил	300	100	Твердый остаток	203,56	67,85
			Вода и смолы	63,00	21,00
			Газы	33,44	11,15
Всего	300	100		300	100

Таблица 5 – Материальный баланс карбонизации илового осадка сточных вод (700 °С)

Входящие продукты	г	%	Исходящие продукты	г	%
Ил	300	100	Твердый остаток	179,65	58,89
Вода			Вода и смолы	49,00	16,33
Всего			Газы	71,35	23,78
Всего	300	100		300	100

Полученные углистые твердые материалы после карбонизации при различных температурах были исследованы с помощью сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией (SEM/EDS).

Сравнительный анализ элементного состава образцов, полученных при температурах 550 °С и 700 °С, показал существенные изменения в концентрациях отдельных элементов, что указывает на термическое преобразование материалов (рисунки 2 и 3).

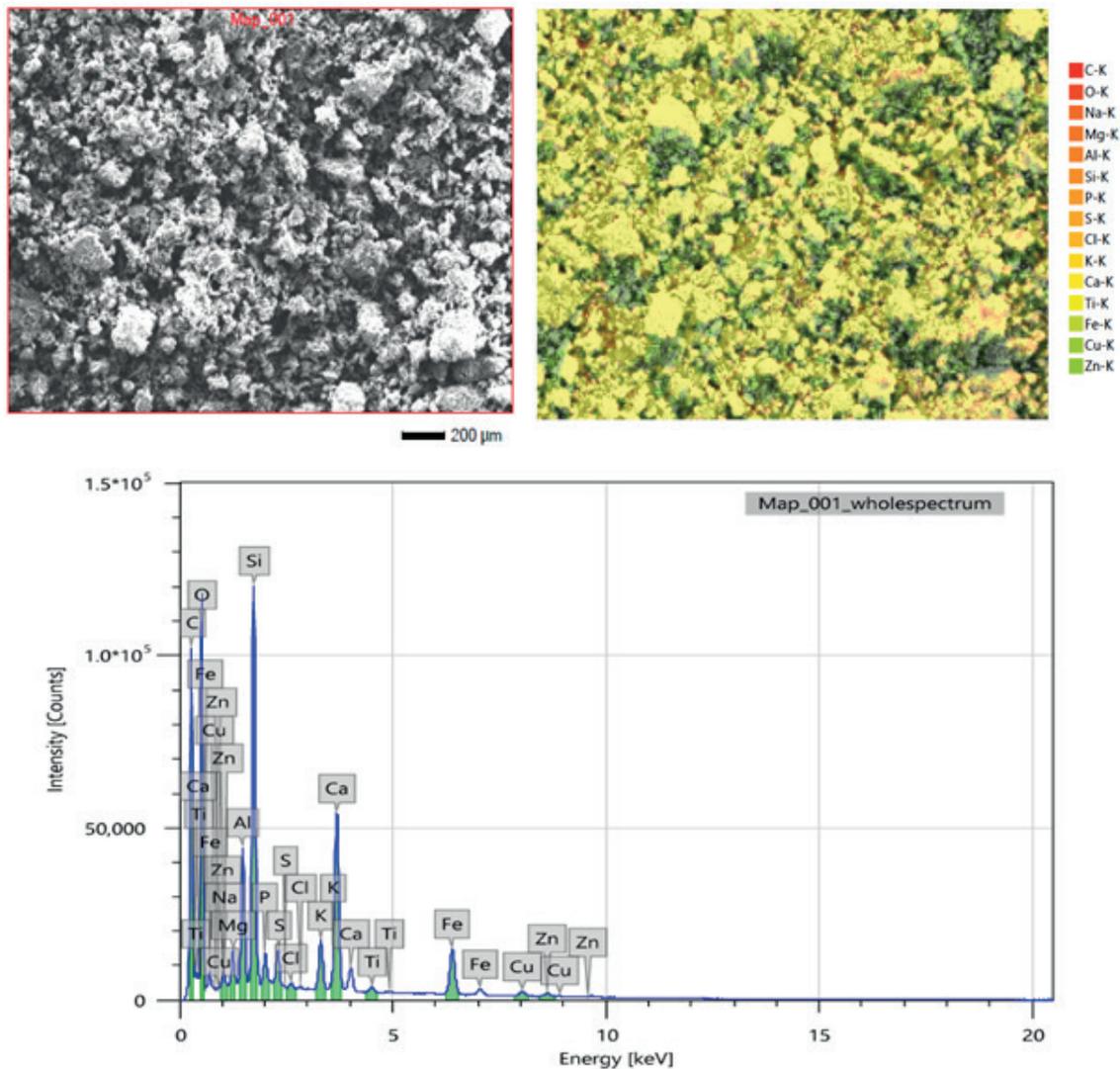
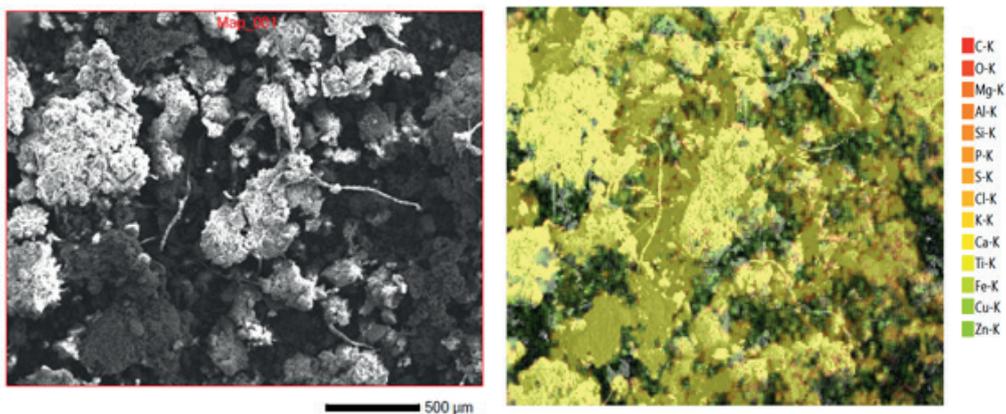


Рисунок 2 – EDS спектр элементного состава карбонизированного илового осадка, полученный при 550 °С

Для образца, обработанного при 550 °С, основным элементом является углерод (С), составляющий 40,42% по массе и 53,99% по атомной доле (таблица 6). При увеличении температуры до 700 °С концентрация углерода заметно возросла до 43,93% по массе и 57,56% по атомной доле. Это указывает на усиление карбонизации материала, что характерно для процессов термической обработки органических остатков.



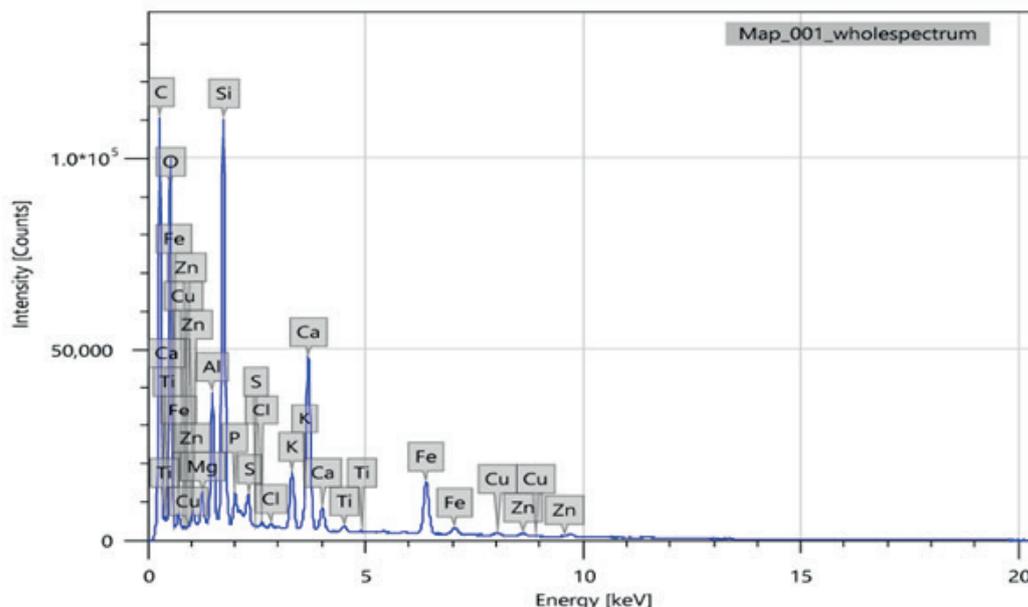


Рисунок 3 – EDS спектр элементного состава карбонизированного илового осадка, полученный при 700 °С

Содержание кислорода (O) показывает противоположную динамику: при повышении температуры доля кислорода снизилась с 33,95% до 32,22% по массе и с 34,04% до 31,69% по атомной доле. Это свидетельствует о дегидратации и удалении летучих кислородсодержащих соединений.

Содержание алюминия (Al) и кремния (Si) незначительно уменьшается при повышении температуры, что подтверждает их термическую стабильность в условиях эксперимента. При этом изменения в содержании кальция (Ca), серы (S), и железа (Fe) остаются минимальными, что может быть связано с их слабой подвижностью в данных температурных условиях.

Незначительное изменение концентрации фосфора (P) и калия (K) при увеличении температуры с 550 °С до 700 °С свидетельствует об их устойчивости к термическому воздействию. Этот факт подтверждает целесообразность применения пиролиза как эффективного метода для получения минеральных удобрений, сохраняя при этом ценные питательные элементы в составе продукта. Такие результаты подчеркивают перспективность технологии термической обработки осадков сточных вод для создания экологически безопасных и эффективных удобрений.

Таблица 6 – Элементный состав образцов после карбонизации

Элемент	Массовая доля в % при 550 °С	Атомная доля в % при 550 °С	Массовая доля в % при 700 °С	Атомная доля в % при 700 °С
C	40,42±0,03	53,99±0,04	43,93±0,03	57,56±0,04
O	33,95±0,04	34,04±0,04	32,22±0,04	31,69±0,04
Na	0,50±0,01	0,35±0,00	-	-
Mg	0,76±0,00	0,50±0,00	0,69±0,00	0,45±0,00
Al	2,63±0,01	1,57±0,00	2,41±0,01	1,40±0,00
Si	7,30±0,01	4,17±0,01	6,99±0,01	3,91±0,01
P	0,83±0,00	0,43±0,00	0,64±0,00	0,33±0,00
S	0,89±0,00	0,45±0,00	0,66±0,00	0,33±0,00
Cl	0,17±0,00	0,08±0,00	0,17±0,00	0,08±0,00
K	1,53±0,01	0,63±0,00	1,68±0,01	0,68±0,00
Ca	5,91±0,01	2,37±0,00	5,50±0,01	2,16±0,00

Продолжение таблицы 6

Ti	0,25±0,00	0,08±0,00	0,25±0,00	0,08±0,00
Fe	3,63±0,01	1,04±0,00	4,01±0,01	1,13±0,00
Cu	0,63±0,01	0,16±0,00	0,40±0,01	0,10±0,00
Zn	0,58±0,01	0,14±0,00	0,44±0,01	0,10±0,00

Микрофотографии образцов представлены на рисунке 4. Морфологический анализ образцов выявил неоднородность поверхности.

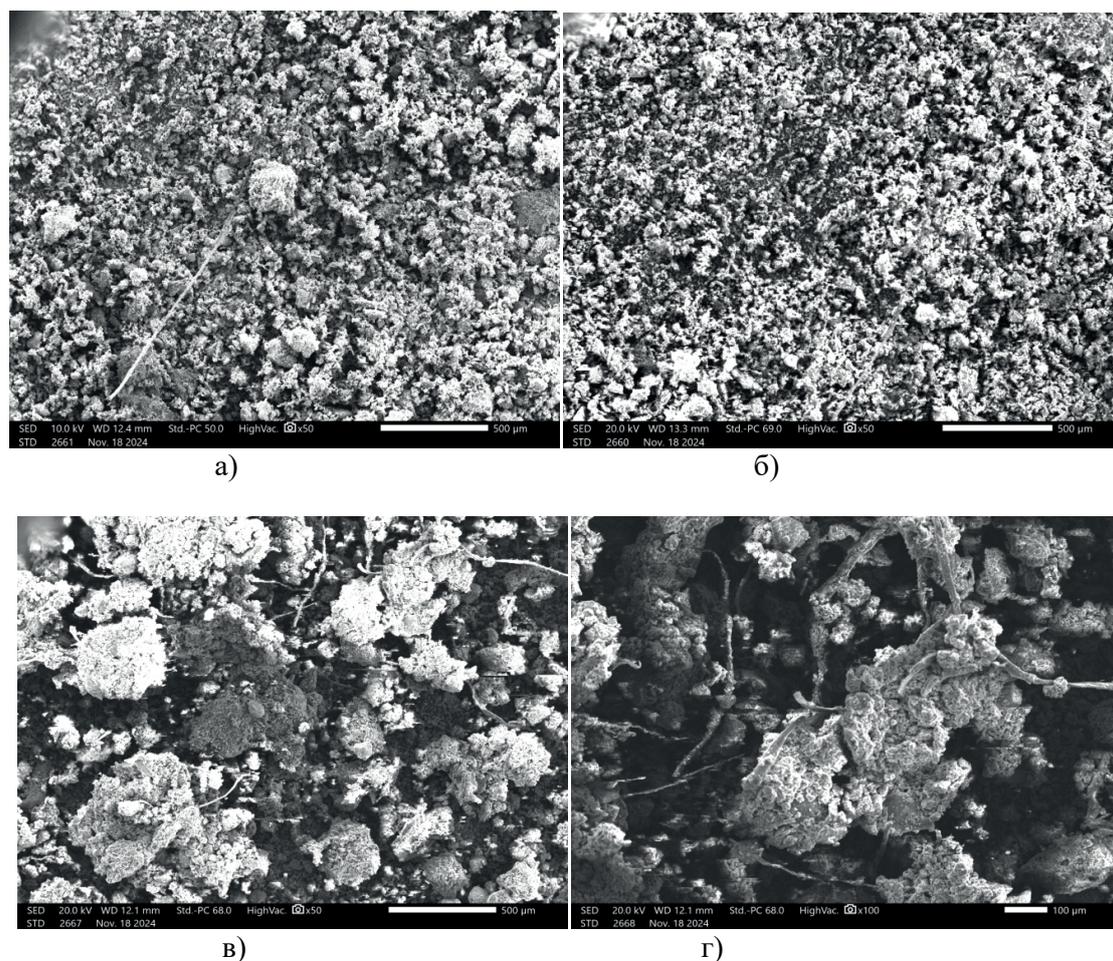


Рисунок 4 – Электронно-микроскопические снимки образцов: карбонизированный иловый осадок, полученный при 550 °С (а – $\times 10000$, б – $\times 20000$) и карбонизированный иловый осадок, полученный при 700 °С (в – $\times 20000$, г – $\times 20000$)

Электронно-микроскопические изображения карбонизированных образцов, представленные на рисунке 4 характеризуются включениями в виде хлопьев в углеродной матрице, частицами пластинчато-лестничной формы и частицами углеродных нанотрубок. Эти нанотрубки могут образовываться путем газофазного осаждения углеродных матриц на поверхности металлических активных частиц (например, Ti, Fe, Cu или Zn), присутствующих в продукте, которые могут выступать в качестве катализаторов.

Результаты показали, что первые всходы семян рукколы появились через три дня в кассетной рассадке, где использовалась готовый грунт в чистом виде, поливаемый растворами с различным содержанием ила, что указывает на благоприятное влияние карбонизированного ила на ранний рост растений (рисунке 4). Во всех других ячейках ростки появились через неделю.

Ячейка №6 (грунт, вода + ил (550 °С)) в кассетной рассаде №2 показала наибольшую длину ростка – 8 см. Наибольшее количество ростков было в ячейках №5, №10 (грунт + ил (700 °С), 70:30; вода) с результатом 18 шт. На основе полученных данных построены две диаграммы (рисунках 5 и 6).

Результаты эксперимента по выращиванию рукколы с использованием грунта и поливочных растворов различных по составу показали значительные различия в росте и развитии растений.

Хронология ключевых событий:

11 октября 2024 года, на 5-й день эксперимента, в ячейке №6 (грунт, гумат калия 0,1% + ил (550 °С)), кассетная рассада №2, росточки показали лучший результат с длиной 2-4 см, что свидетельствует о более раннем начале цветения при использовании данного состава поливочного раствора.

К 15 октября 2024 года наблюдалась следующая картина цветения:

- Ячейки №1 и №6, рассада №3, (грунт + ил (550 °С), 90:10; вода): 15 ростков.
- Ячейки №5 и №10, рассада №0, (грунт + ил (700 °С), 70:30; вода): 13 ростков.
- Ячейки №1 и №6, рассада №0, (грунт + вода): 12 ростков.

Анализ ростков выявил максимальный рост в следующих ячейках:

- Ячейка №6, рассада №2, (грунт, вода + ил (550 °С)): 6 см.
- Ячейка №3, рассада №0, (грунт, гумат калия 0,1% + ил (550 °С)): 5,5 см.
- Ячейка №1, рассада №0, (грунт + вода): 4,5 см.



Рисунок 4 – Кассеты с рассадой (№3, №2 и №0, слева направо) на 16-й день эксперимента

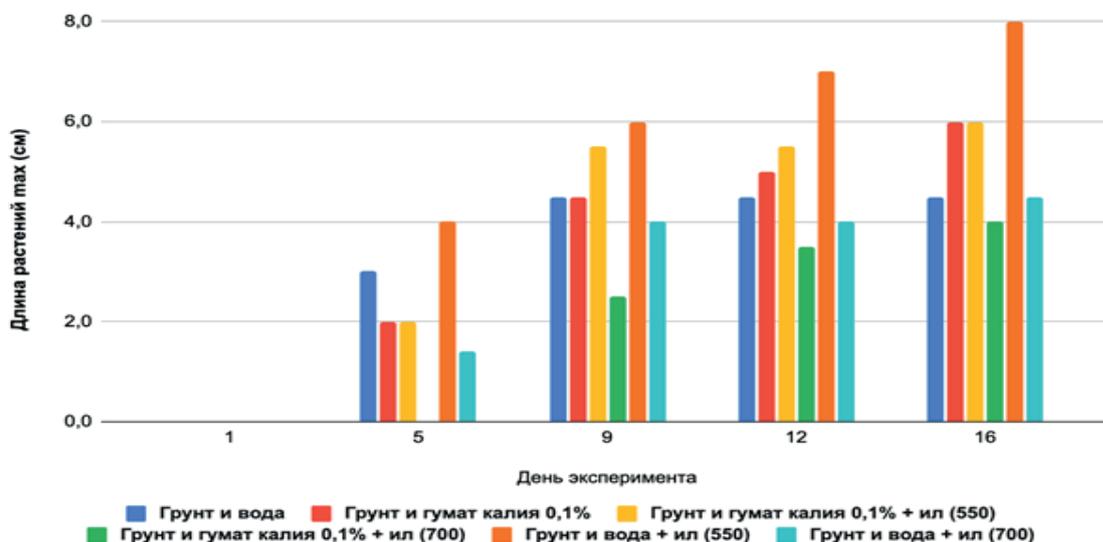


Рисунок 5 – Диаграмма зависимости длины ростка от полива и времени

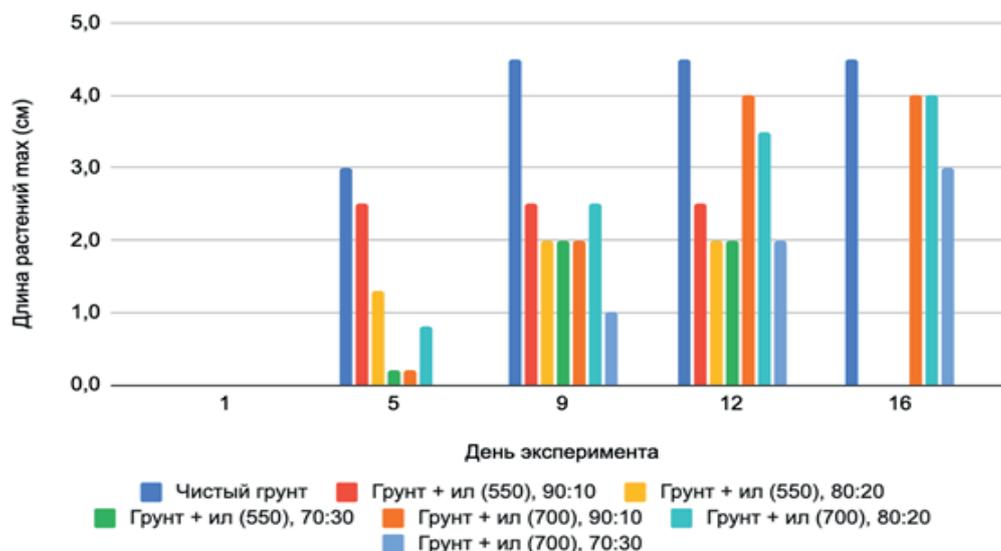


Рисунок 6 – Диаграмма зависимости длины ростка от состава грунта и времени

Эти данные подтверждают положительное влияние ила как удобрения, применяемого в твердом виде и в качестве поливочного раствора.

22 октября 2024 года, ростки в ячейках, наполненных грунтом в смеси с илом (550 °C) засохли, демонстрируя низкую устойчивость. Растения в ячейках №5 и №10, рассада №0, показали наибольшую устойчивость, увеличив количество цветков до 18 (рисунки 7 и 8).

Растения в ячейках №6, рассада №2, показали наибольший рост, увеличив максимальную длину ростков до 8 см.

Эксперимент показал, что удобрения на основе карбонизированного илового осадка, оказывают наиболее благоприятное воздействие на рост рукколы. Растения, обработанные этими удобрениями, демонстрировали более ранний всход семян, лучшее развитие ростков, более высокую устойчивость. Эти результаты свидетельствуют о потенциале использования карбонизированного илового осадка, для повышения урожайности и устойчивости сельскохозяйственных культур.

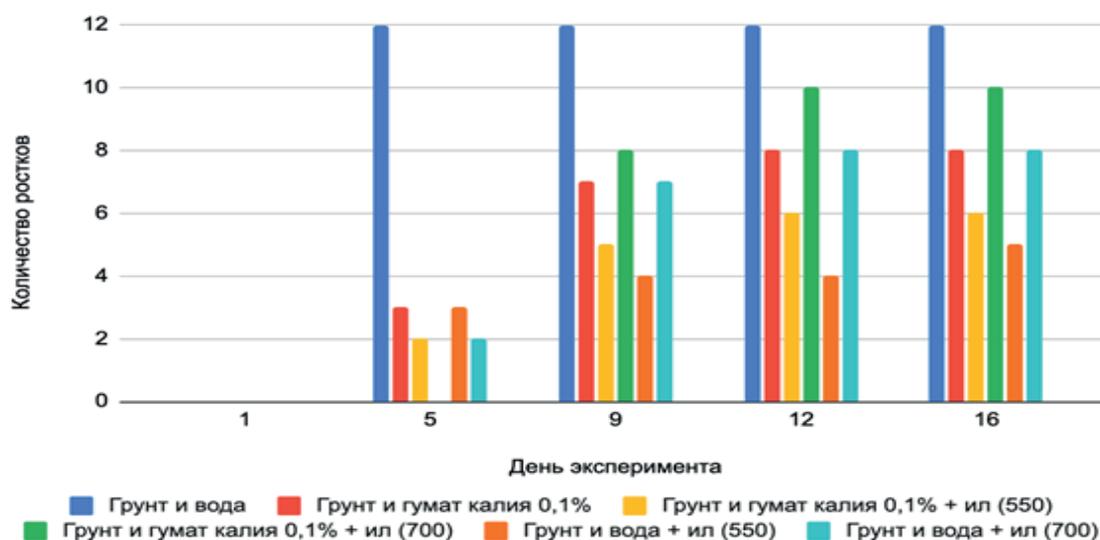


Рисунок 7 – Диаграмма зависимости количества ростков от полива и времени

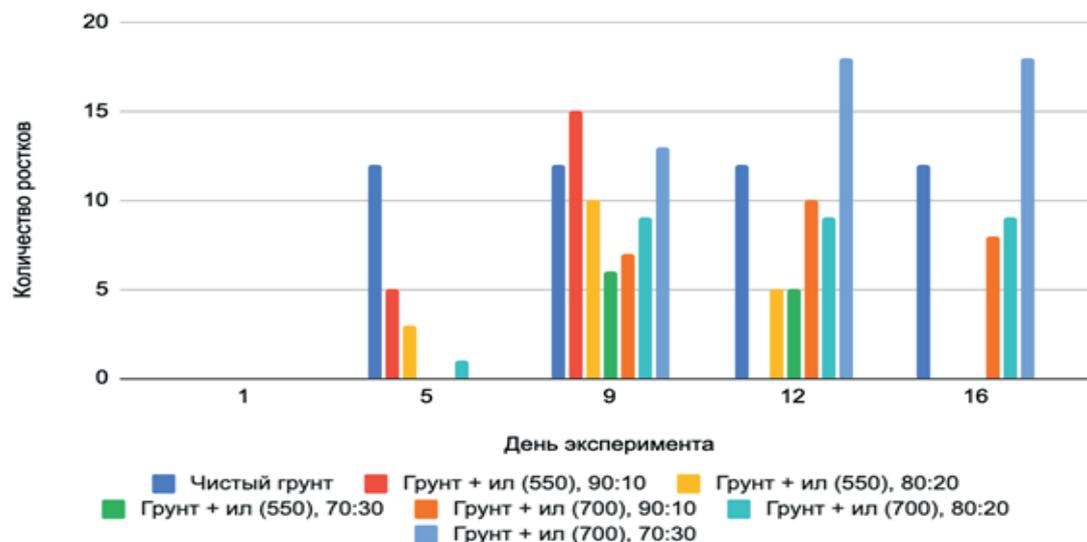


Рисунок 8 – Диаграмма зависимости количества ростков от состава грунта и времени

Анализ химического состава показал, что содержание тяжелых металлов в карбонизированном шламе не превышает допустимых значений, установленных санитарными нормами. В частности, содержание цинка составляет до 20,3 мг/кг, а меди до 52,3 мг/кг в пересчете на сухое вещество. В соответствии с требованиями Технического регламента СанПиН 2.1.7.1322-03 предельно допустимая концентрация цинка в удобрениях не превышает 1000 мг/кг, а меди - 750 мг/кг. Таким образом, исследуемый карбонизированный шлак полностью соответствует нормативным требованиям по содержанию меди и цинка, что подтверждает его экологическую и санитарную безопасность для использования в сельском хозяйстве.

Таблица 7 – Сравнительная таблица показатели традиционных минеральных удобрений и карбонизированного ила

Показатель	Карбонизированный ил	Минеральные удобрения
Источник макроэлементов (NPK)	есть, но в умеренных дозах	высокий
Органическое вещество / углерод	да	отсутствует
Долговременное действие	да (медленное высвобождение)	кратковременное
Побочные продукты	нет	возможно закисление почвы
Ресурсосбережение	да (вторсырьё)	нет
Содержание гумуса, %	20,3-29,3	отсутствует

По результатам сравнительного анализа, по сравнению с традиционными минеральными удобрениями, карбонизированный ил содержит больше органического вещества и гумуса (до 29,3%), что улучшает структуру почвы, имеет долгосрочное действие, обеспечивающее постепенное высвобождение питательных веществ, а также способствует экономии ресурсов. Использование карбонизированного ила в качестве удобрения оказывает долгосрочное положительное влияние на здоровье почвы. Это связано с тем, что удобрение карбонизированным илом приводит к увеличению содержания связанного органического углерода, что способствует формированию гумусового горизонта и баланса углерода, стимулирует микробиоту почвы за счет создания благоприятной микросреды и пористой структуры карбонизированного ила, а

также может проявлять буферную способность против закисления за счет щелочной реакции карбонизированных материалов. Таким образом, карбонизированное иловое удобрение можно считать эффективной и безопасной альтернативой традиционным минеральным удобрениям.

Заключение

Проведенное исследование продемонстрировало значительный потенциал использования карбонизированного илового осадка сточных вод в качестве удобрения. Экспериментально установлено, что добавление осадка, подвергнутого карбонизации при температурах 550 °С и 700 °С, способствует улучшению агрономических характеристик почвы, ускорению прорастания семян рукколы и повышению устойчивости растений к неблагоприятным условиям.

Осадок, карбонизированный при 700 °С, проявил наибольшую эффективность благодаря оптимальному соотношению сохранных питательных веществ и снижению токсичности. Смеси почвы с различным содержанием ила продемонстрировали не только увеличение биомассы растений, но и потенциал для долгосрочного применения в аграрных системах, направленных на устойчивое развитие.

Полученные результаты свидетельствуют о перспективности метода карбонизации для утилизации иловых осадков, позволяя одновременно решать задачи переработки отходов и повышения сельскохозяйственной продуктивности. Внедрение данной технологии может стать важным шагом на пути к сокращению нагрузки на окружающую среду, улучшению качества почвы и созданию ресурсосберегающих систем земледелия.

Дальнейшие исследования могут быть сосредоточены на изучении влияния карбонизированного илового осадка на другие сельскохозяйственные культуры, а также на разработке масштабируемых методов его применения в различных климатических и почвенных условиях. Также необходимо разработать эффективные методы удаления или нейтрализации тяжелых металлов, чтобы обеспечить экологическую безопасность получаемого продукта. Это может включать использование сорбентов, химической обработки или биотехнологических подходов. Такие меры позволят создать высокоэффективные минеральные удобрения с минимальным воздействием на окружающую среду, что особенно важно в условиях роста потребностей в продовольствии и сохранения экологической устойчивости.

Вклад авторов

ЖХ, МК, БЕ и ЖК: концептуализировали и оформили исследование, провели всесторонний анализ литературы, интерпретировали полученные данные и подготовили первоначальный вариант рукописи. КБ, НА, КТ и ЖТ: участвовали в постановке эксперимента, сборе и обработке экспериментальных данных. ФА, АМ и ЭА: провели критический анализ и окончательную редакцию рукописи. Все авторы прочитали, просмотрели и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о финансировании

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках программно-целевого финансирования №BR24992833 «Разработка химических и биохимических решений для сокращения углеродного следа и восстановления экосистем через переработку отходов».

Список литературы

- 1 Благоразумова, АМ. (2014). *Обработка и обезвоживание осадков городских сточных вод*. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Издательство «Лань», 208.
- 2 Воронов, ЮВ, Яковлев, СВ. (2006). *Водоотведение и очистка сточных вод: учебное пособие*. Москва: 704.
- 3 Оспанов, КТ. (2013). Анализ современного состояния обработки осадков сточных вод городов Республиканского назначения. *Вестник КазНТУ*, 5, 22-25.

- 4 Исламов, ЕИ. (2015). Об актуальных вопросах очистки канализационных сточных вод в городе Астане. *Вестник УГНТУ*, 1(11), 109-111.
- 5 Ahmad, S., et al. (2019). Physico-chemical properties of sewage sludge and its energy recovery potential. *Journal of Environmental Management*, 240, 200-212.
- 6 Raheem, A. (2018). Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: a review. *Chemical Engineering Journal*, 337, 616-641.
- 7 Furr, AK, Parkinson, TF, Bache, CA, Gutenmann, WH, Pak-kala, IS, aLisk, DJ. (1980). Multielement absorption by crops grown on soils amended with municipal sludge ashes. *J. Agric. Food Chem*, 28, 660-662.
- 8 Gorazda, K., et al. (2017). Fertilizers production from ashes after sewage sludge combustion A strategy towards sustainable development. *Environmental Research*, 154, 171-180.
- 9 Bierman, PM, Rosen, CJ. (1994). Phosphate and trace metal availability from sewage-sludge incinerator ash. *Journal of Environmental Quality*, 23, 822-830.
- 10 Sharma, P., Reddy, KV. (2017). High volatile matter content in solid materials indicates great potential for energy production through pyrolysis. *Bioresource Technology*, 241, 111-119.
- 11 Klein, M., Limmer, M., Reinhold, P. (2018). Phosphorus recovery from sewage sludge: a review of possible technologies. *Waste and Biomass Valorization*, 9, 767-779.
- 12 Metcalf, LJ, Eddy, HP. (2014). Carbonization: transformation of organic matter into carbon-rich biochar at high temperatures. *Wastewater Treatment: Purification and Resource Recovery*. 5th ed. Moscow: McGraw-Hill. 810.

References

- 1 Blagorazumova, AM. (2014). *Obrabotka i obezvozhivanie osadkov gorodskikh stochnykh vod*. 2-e izd., ispr. i dop. SPb.: Izdatel'stvo "Lan", 208.
- 2 Voronov, YuV, Yakovlev, SV. (2006). *Vodootvedenie i ochistka stochnykh vod: uchebnoe posobie*. Moskva: 704.
- 3 Ospanov, KT. (2013). Analiz sovremennogo sostoyaniya obrabotki osadkov stochnykh vod gorodov Respublikanskogo naznacheniya. *Vestnik KazNTU*, 5, 22-25.
- 4 Islamov, EI. (2015). Ob aktual'nykh voprosakh ochistki kanalizatsionnykh stochnykh vod v gorode Astane. *Vestnik UGNTU*, 1(11), 109-111.
- 5 Ahmad, S., et al. (2019). Physico-chemical properties of sewage sludge and its energy recovery potential. *Journal of Environmental Management*, 240, 200-212.
- 6 Raheem, A. (2018). Opportunities and challenges in sustainable treatment and resource reuse of sewage sludge: a review. *Chemical Engineering Journal*, 337, 616-641.
- 7 Furr, AK, Parkinson, TF, Bache, CA, Gutenmann, WH, Pak-kala, IS, Lisk, DJ. (1980). Multielement absorption by crops grown on soils amended with municipal sludge ashes. *J. Agric. Food Chem*, 28, 660-662.
- 8 Gorazda, K., et al. (2017). Fertilizers production from ashes after sewage sludge combustion A strategy towards sustainable development. *Environmental Research*, 154, 171-180.
- 9 Bierman, PM, Rosen, CJ. (1994). Phosphate and trace metal availability from sewage-sludge incinerator ash. *Journal of Environmental Quality*, 23, 822-830.
- 10 Sharma, P., Reddy, KV. (2017). High volatile matter content in solid materials indicates great potential for energy production through pyrolysis. *Bioresource Technology*, 241, 111-119.
- 11 Klein, M., Limmer, M., Reinhold, P. (2018). Phosphorus recovery from sewage sludge: a review of possible technologies. *Waste and Biomass Valorization*, 9, 767-779.
- 12 Metcalf, LJ, Eddy, HP. (2014). Carbonization: transformation of organic matter into carbon-rich biochar at high temperatures. *Wastewater Treatment: Purification and Resource Recovery*. 5th ed. Moscow: McGraw-Hill. 810.

Тазартылған ағын сулардың карбонизацияланған тұнбаларын минералды тыңайтқыш ретінде қолдану: экологиялық және агрономиялық аспектілері

Хасен Ж.М., Казанкапова М.К., Ермағамбет Б.Т., Касенова Ж.М.,
Бейсембаева К.А., Акимбеков Н.Ш., Тастамбек К.Т., Тауанов Ж.Т.,
Алдынгурова Ф.Ж., Малғаждарова А.Б., Акшекина Ә.С.

Түйін

Алғышарттар мен мақсат. Ауыл шаруашылығында тұрақты технологияларға деген сұраныстың артуы жағдайында пиролизге ұшыраған ағынды сулардың тұнбасын тыңайтқыш ретінде екінші рет пайдалану мүмкіндігі зерттелді. Зерттеудің мақсаты – өсімдіктердің өсуін қолдайтын қауіпсіз әрі тиімді өнім алу үшін тұнбаны карбонизациялау температурасының оңтайлы мәндерін анықтау.

Материалдар мен әдістер. Модельдік өсімдік ретінде қоршаған орта жағдайларына тез жауап беретіндіктен, руккола микроөсімділер (*Eruca sativa*) таңдалды. 350-700 °C температурада карбонизацияланған тұнбаның әртүрлі мөлшерін (10-30 %) қамтитын топырақ үлгілері дайындалып, алты түрлі суару режимі, соның ішінде калий гуматы қолданылды.

Нәтижелер. Зерттеу нәтижелері 700 °C температурада карбонизацияланған тұнбаның өсімдік өсуіне ең қолайлы әсер ететінін көрсетті: тұқымдардың жылдам өнуі, өскіндердің ұзын болуы және өнімділіктің артуы байқалды. Бұл нәтиже материалдың уыттылығының төмендеуімен және термиялық өңдеу барысында қоректік заттардың сақталуымен байланысты.

Қорытынды. Зерттеу карбонизацияланған тұнбаның дәстүрлі тыңайтқыштарға экологиялық тұрғыдан тиімді балама бола алатынын және оны айналмалы экономика дамуына енгізу әлеуетін көрсетеді.

Кілт сөздер: ил тұнбасы; карбонизация; пиролиз; тұрақты ауыл шаруашылығы; қалдықтарды тиімді басқару; агроэкология.

Utilization of carbonized sewage sludge as a mineral fertilizer: environmental and agronomic aspects

Zhanna M. Khassen, Maira K. Kazankapova, Bolat T. Yermagambet, Zhanar M. Kassenova,
Kulzhan A. Beisembayeva, Nuraly S. Akimbekov, Kuanysh T. Tastambek, Zhandos T. Tauanov,
Firyuza Zh. Aldyngurova, Ainagul B. Malgazhdarova, Assel S. Akshekina

Abstract

Background and Aim. In the context of the growing need for sustainable agricultural technologies, this study explores the possibility of recycling pyrolyzed sewage sludge as a fertilizer. The aim was to identify the optimal carbonization temperature of sewage sludge to obtain a safe and effective product that promotes plant growth.

Materials and Methods. *Arugula* microgreens (*Eruca sativa*) were used as a model due to their rapid response to environmental changes. Soil samples with different carbonized sludge contents (10-30%) processed at temperatures ranging from 350 to 700 °C, were prepared, and six irrigation regimes were applied, including one with potassium humate.

Results. The experimental results showed that sludge carbonized at 700 °C had the most beneficial effect on plant growth: enhanced germination, shoot elongation, and increased yield were observed. These effects are attributed to the detoxification of the material and the preservation of nutrients during thermal treatment.

Conclusion. The study highlights the potential of carbonized sludge as an environmentally friendly alternative to conventional fertilizers and its contribution to the development of a circular economy.

Keywords: sewage sludge; carbonization; pyrolysis; sustainable agriculture; efficient waste management; agroecology.