

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. -№ 3 (127). - Р.208-216. - ISSN 2710-3757, ISSN 2079-939X

doi.org/10.51452/kazatu.2025.3(127).2038

УДК 543.3+631.8

Исследовательская статья

### Синтез наноудобрений на цеолитовой основе: подход и характеристики

Нургазина Г.М.<sup>1</sup> , Алимкулова Э.Ж.<sup>2</sup> , Букеева А.Б.<sup>2</sup> , Әшірбек А.Қ.<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Международный университет Астана

Астана, Казахстан,

<sup>2</sup>Казахский агротехнический исследовательский университет им. С.Сейфуллина

Астана, Казахстан

**Автор-корреспондент:** Нургазина Г.М.: ast.gulnar@mail.ru

**Соавторы:** (1: ЭА) alimkulova\_ema@mail.ru; (2: АБ) akbota712@mail.ru;

(3: АӘ) aynur.ashirbekova@mail.ru

**Получено:** 30.07.2025 **Принято:** 26.09.2025 **Опубликовано:** 30.09.2025

#### Аннотация

**Предпосылки и цель.** Рост затрат на минеральные удобрения снижает рентабельность сельского хозяйства и требует внедрения инновационных агротехнологий. Одним из решений является использование наноудобрений на основе цеолита как носителя, способного обеспечивать пролонгированное высвобождение питательных веществ. Целью настоящего исследования является получение эффективных наночастиц удобрений с использованием природного цеолита для фиксации и доставки макро- и микроэлементов.

**Материалы и методы.** В работе применяли природный клиноптилолит (Казахстан), модифицированный соединениями фосфора, калия и микроэлементов (Zn, Cu, Mn). Используются физико-химические методы анализа: ИК-спектроскопия, ВЕТ-анализ, атомно-абсорбционная спектроскопия.

**Результаты.** Эксперименты показали высокую сорбционную способность цеолита, устойчивое удержание и равномерное высвобождение питательных веществ в зависимости от среды. Биотесты продемонстрировали ростовую активность удобрений и повышение устойчивости растений к стрессовым условиям.

**Заключение.** Разработанные наноудобрения на основе модифицированного цеолита отличаются экологической безопасностью, пролонгированным действием и способствуют устойчивому сельскому хозяйству.

**Ключевые слова:** цеолит; наноудобрения; медленное высвобождение; микроэлемент; ионообмен; сорбция.

#### Введение

В последнее десятилетие рост мирового населения заставляет сельскохозяйственный сектор увеличить урожайность, чтобы удовлетворить потребности человека. Опыты показывают, что крупномасштабное применение химических удобрений для повышения урожайности приводят к непоправимому повреждению структуры почвы, минеральных циклов, микробной флоры почвы, растений, тем самым нарушая минеральный баланс почвы и снижая плодородие почвы [1, 2, 3]. Большая часть удобрений во влажной почве быстро распадаются, смывается дождями и талыми водами, попадая в реки, озера и грунтовые воды, попадая в атмосферу в виде оксидов создают серьезную экологическую проблему. Быстрый распад удобрения снижает необходимое его количество, которое должны получить корни растений. Это все приводит к необходимости

использования больше удобрений для увеличения производства. Вот почему мы должны найти новые способы доставки питательных веществ, минимизируя при этом их воздействие на окружающую среду. Внедрение наноудобрений – одна из инновационных стратегий, направленных на решение этой проблемы [4].

Термин «нанотехнология» ввел в науку японский учёный Норио Тонигучи в 1974 г. Размер наночастиц колеблется между 1 и 100 нм (1 нм = 10<sup>-9</sup> м) [5].

Наночастицы, которые были получены многими учеными [6, 7], обладают большой удельной площадью поверхности и высокой реакционной способностью, что открывает множество путей их использования в самых разных областях человеческой деятельности, включая сельское хозяйство.

Наноудобрения – это не столько подкормка микроудобрениями, сколько дозированное поступление в клетки микроэлементов, необходимых для синтеза ферментов, которые ускоряют рост и развитие, формируя мощную корневую систему [8].

Функционирование живых организмов, включая растения, связано с большим числом биохимических процессов, катализируемых особыми белковыми молекулами – ферментами. Для поддержания их активности необходимы определённые микроэлементы, такие как железо, медь, цинк, марганец, кобальт и молибден. Однако, не все из этих элементов в доступной форме могут легко проникать сквозь клеточные мембраны и усваиваться растениями. В результате часто применяется избыточное внесение удобрений, что не только снижает их эффективность, но и увеличивает нагрузку на окружающую среду [9].

Согласно данным из работы [4], наночастицы успешно действуют как транспортные структуры для фосфатных соединений, обеспечивая их равномерное и замедленное поступление в почву. Исследования свидетельствуют, что растения способны регулировать потребление элементов питания: в фазе активного роста корневая система выделяет органические кислоты (например, лимонную и щавелевую), которые растворяют наночастицы и запускают высвобождение фосфатов. Таким образом, скорость отдачи питательных веществ напрямую зависит от физиологического состояния растения.

Для стабилизации и доставки наночастиц требуются эффективные носители, способные обеспечивать контролируемое и пролонгированное высвобождение питательных компонентов.

Среди различных материалов, используемых в качестве носителей для питательных веществ, природные цеолиты занимают особое место благодаря своей уникальной структуре [8, 9]. Эти минералы представляют собой алюмосиликатные соединения с пространственно-упорядоченной пористой решеткой, образованной тетраэдрами кремния и алюминия. Такая структура формирует развитую систему каналов и полостей, способных аккумулировать и контролируемо выделять важнейшие элементы питания растений. Цеолиты характеризуются высокой сорбционной способностью и эффективным ионным обменом, что позволяет уменьшить потери азота, фосфора и других компонентов за счет снижения их вымывания и испарения. Помимо этого, они являются стабильными, экологически нейтральными соединениями, безопасными для почвы, с возможностью многократного использования без снижения эффективности [10, 11].

Научная новизна работы заключается в разработке комплексной технологии получения наноудобрений с использованием природного клиноптилолита в качестве носителя, модифицированного макро- и микроэлементами. Такой подход обеспечивает контролируемое и пролонгированное высвобождение питательных веществ, адаптированное к физиологическим потребностям растений, что позволяет повысить эффективность использования удобрений и снизить экологическую нагрузку на почву и водные экосистемы.

Цель исследования – разработка и исследование эффективных наночастиц удобрений на основе модифицированного природного цеолита для пролонгированной доставки макро- и микроэлементов, обеспечивающих оптимальное питание растений и повышение их устойчивости к стрессовым факторам.

### **Материалы и методы**

В качестве основного носителя использовался природный цеолит (клиноптилолит) фракции 0,1-0,5 мм, предварительно очищенный и прокалённый при температуре 300 °С. Для

модификации использовались водные растворы соединений фосфора ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ), калия ( $\text{KNO}_3$ ) и микроэлементов ( $\text{ZnSO}_4$ ,  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{MnCl}_2$ ).

Для количественного определения содержания микроэлементов ( $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ), сорбированных цеолитом и высвобождаемых в модельных условиях, применяли методы спектрофотометрически и атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС). Измерения проводились на спектрометре с пламенной атомизацией, при строго контролируемых параметрах (длина волны, поток газа, температура горения). Для каждого элемента использовалась индивидуальная аналитическая линия: цинк ( $\text{Zn}^{2+}$ ) – 213,9 нм, медь ( $\text{Cu}^{2+}$ ) – 324,8 нм, марганец ( $\text{Mn}^{2+}$ ) – 279,5 нм.

Калибровочные растворы готовились из стандартов с известной концентрацией, с построением градуировочных графиков, обладающих линейной зависимостью в диапазоне рабочих концентраций. Образцы отбирались после экстракции раствором с заданным pH на разных стадиях (через 0, 2, 4, 6, 8, 10 суток), с последующим фильтрованием.

Определение удельной поверхности и пористости проводилось методом БЭТ (низкотемпературная адсорбция азота). Изотермы снимались при относительном давлении  $P/P_0$  от 0,05 до 0,35.

Эксперименты по высвобождению питательных веществ оценивались в водной и слабокислой среде с определением концентрации с периодическим отбором проб через каждые 24 часа. Биотестирование эффективности сорбированных форм проводили на ячмене и салате в лабораторных условиях. Ростовые характеристики оценивали в сравнении с контрольной группой.

### Результаты и обсуждение

Важной характеристикой цеолитов, определяющей их сорбционную способность и эффективность в качестве носителей питательных веществ, являются параметры пористой структуры. Для оценки влияния модификации на текстурные свойства природного клиноптилолита был проведён ВЕТ-анализ. В таблице 1 представлены ВЕТ-характеристики цеолита до и после модификации.

Таблица 1 – ВЕТ-характеристики цеолита до и после модификации

Параметр	До модификации	После модификации
Удельная поверхность, $\text{м}^2/\text{г}$	41,7	37,1
Объем пор, $\text{см}^3/\text{г}$	0,140	0,119
Средний диаметр пор, нм	3,3	3,1

Из таблицы 1 видно, что модификация цеолита растворами питательных веществ приводит к снижению его текстурных характеристик. Удельная поверхность снизилась с 41,7 до 37,1  $\text{м}^2/\text{г}$ , объем пор – с 0,140 до 0,119  $\text{см}^3/\text{г}$ , а средний диаметр пор уменьшился с 3,3 до 3,1 нм. Эти изменения свидетельствуют о частичном заполнении пор модифицирующими ионами и возможной блокировке микропористой структуры.

Несмотря на уменьшение пористости, цеолит сохранил достаточную поверхность для эффективного взаимодействия с ионами, а изменение структуры может быть даже полезным с точки зрения контролируемого высвобождения. Снижение объема пор и диаметра может способствовать удержанию элементов внутри структуры, тем самым создавая условия для пролонгированного действия удобрения.

Таким образом, ВЕТ-анализ подтвердил, что цеолит после модификации сохраняет высокую структурную активность, обеспечивая как сорбцию, так и замедленную десорбцию питательных веществ.

Исследования показали, что цеолиты эффективно сорбируют питательные элементы. В таблице 2 представлены данные по сорбции ионов фосфора, калия и микроэлементов на 1 г цеолита.

Таблица 2 – Сорбция питательных веществ цеолитом

Элемент	Соединение	Количество сорбированного вещества, мг/г
Фосфор (P)	$\text{NaH}_2\text{PO}_4$	11,7
Калий (K)	$\text{KNO}_3$	7,4
Цинк ( $\text{Zn}^{2+}$ )	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	4,1
Медь ( $\text{Cu}^{2+}$ )	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	3,1
Марганец ( $\text{Mn}^{2+}$ )	$\text{MnCl}_2$	2,7

Согласно данным таблицы 2, модифицированный цеолит эффективно сорбирует как макроэлементы (фосфор, калий), так и микроэлементы (цинк, медь, марганец). Наибольшая сорбционная емкость зафиксирована для ионов фосфора (11,7 мг/г), что согласуется с литературными данными о высокой аффинности цеолита к фосфат-анионам. Это может быть связано с возможностью комплексообразования между  $\text{PO}_4^{3-}$  и поверхностными группами  $\text{Si-O}^-$  и  $\text{Al-O}^-$  в структуре клиноптилолита.

Калий в форме  $\text{KNO}_3$  сорбировался в меньшем количестве (7,4 мг/г), что связано с его высокой растворимостью и слабой сорбцией на ионообменных сайтах. Микроэлементы  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Mn}^{2+}$  продемонстрировали удовлетворительную сорбцию в пределах 2,7–4,1 мг/г, причем цинк показал наибольшую степень фиксации. Это может быть обусловлено, как электростатическим взаимодействием, так и гидратной энергией иона, а также сродством к катионообменным центром цеолита.

Таким образом, полученные значения подтверждают, что цеолит является эффективным сорбентом, способным удерживать различные типы питательных веществ – как катионы, так и анионы – и может быть использован в качестве универсального носителя в составе наноудобрений.

На рисунке 1 представлены ИК-спектры цеолита до и после сорбции соединений фосфора ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), калия ( $\text{K}^+$ ) и микроэлементов ( $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ).

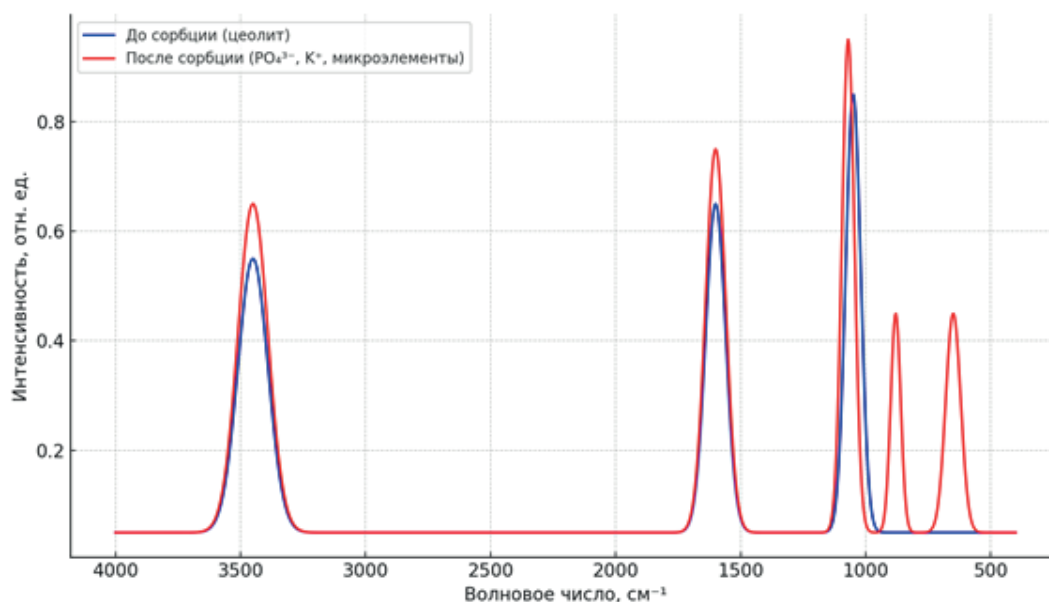


Рисунок 1 – ИК-спектры цеолита до и после сорбции соединений фосфора ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), калия ( $\text{K}^+$ ) и микроэлементов

Как показано на рисунке 1, до сорбции (синий спектр) фиксируются характерные полосы каркасных колебаний  $\text{Si-O-Si}$  ( $\sim 1050 \text{ см}^{-1}$ ) и вибрации воды ( $\sim 1600$  и  $3450 \text{ см}^{-1}$ ). После сорбции (красный спектр) наблюдаются новые полосы около  $1070 \text{ см}^{-1}$  и  $880 \text{ см}^{-1}$ , соответствующие вибрациям иона  $\text{PO}_4^{3-}$ . Одновременно фиксируется смещение и расширение полос  $\text{Si-O-Al}$ , что свидетельствует о взаимодействии каркаса цеолита с фосфатными ионами  $\text{PO}_4^{3-}$ , а также

$\sim 650 \text{ см}^{-1}$  - проявление М–О связей (металл-кислородные связи в координационной сфере) микроэлементов. Также можно увидеть усиление полос в гидроксильной области (О–Н) за счет взаимодействия с водой или гидроксогруппами. Изменения в водных полосах также указывают на участие цеолита в процессе сорбции.

Присутствие алюминия в каркасе создаёт отрицательный заряд, компенсируемый подвижными катионами, которые могут быть легко замещены на другие питательные катионы, такие как  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ . Благодаря этому цеолиты действуют как ионнообменники, захватывая питательные элементы из раствора и удерживая их в доступной форме.

Для оценки агрономической эффективности модифицированных цеолитов было проведено биотестирование на культурах салата и ячменя в лабораторных условиях. Результаты показали увеличение роста растений на 20-30% по сравнению с контрольной группой. Также наблюдалось улучшение устойчивости к засухе, что подтверждает эффективность разработанных систем.

ААС обеспечил высокую чувствительность при измерении остаточной концентрации ионов в растворе, что позволило рассчитать как общее количество сорбированного элемента (разность между исходной и равновесной концентрацией), так и степень его контролируемого высвобождения.

Таблица 3 – Результаты атомно-абсорбционной спектроскопии

Ионы микроэлементов	Сорбировано, мг/г	Высвобождено за 10 суток, %
$\text{Zn}^{2+}$	4,1	71,1
$\text{Cu}^{2+}$	3,1	65,5
$\text{Mn}^{2+}$	2,7	61,1

Анализ результатов, представленных в таблице 3, показывает, что модифицированный цеолит эффективно сорбирует ионы микроэлементов ( $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ) из водных растворов, а также обеспечивает их постепенное высвобождение в течение 10 суток. Наибольшее количество сорбированных ионов зафиксировано для  $\text{Zn}^{2+}$  (4,1 мг/г), далее следуют  $\text{Cu}^{2+}$  (3,1 мг/г) и  $\text{Mn}^{2+}$  (2,7 мг/г). Это может быть обусловлено различиями в ионном радиусе, заряде, а также аффинностью ионов к активным центрам цеолита.

На рисунке 2 показана динамика высвобождения ионов  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Mn}^{2+}$  из модифицированного цеолита в течение 10 суток.

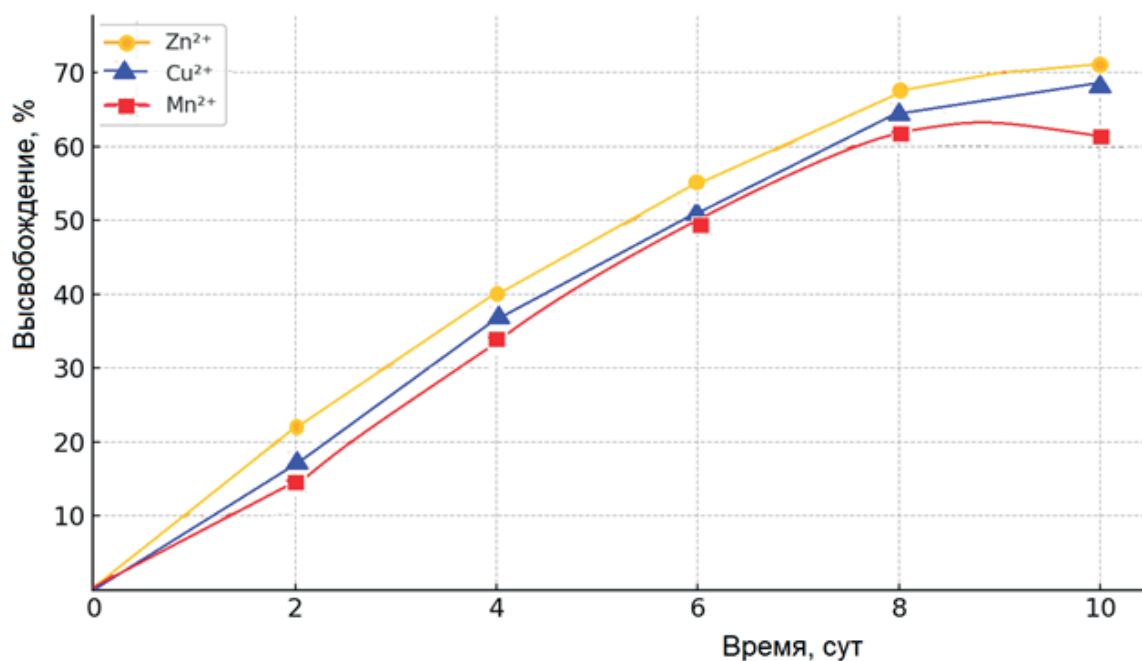


Рисунок 2 – Динамика высвобождения микроэлементов из цеолита



Из рисунка 2 можно увидеть процентное высвобождение ионов из цеолита в модельных условиях имитированного почвенного раствора, которое составило: 71,1% для  $Zn^{2+}$ , 68,5% для  $Cu^{2+}$  и 61,1% для  $Mn^{2+}$ . Таким образом, наблюдается умеренно-продолжительный характер десорбции, что свидетельствует о способности цеолита регулировать поступление элементов в раствор, снижая риски как дефицита, так и избыточного содержания микроэлементов в зоне корнеобитания.

Особенно важно, что равномерное высвобождение микроэлементов происходит в течение длительного периода, что соответствует принципам устойчивого земледелия и минимизирует потери элементов вследствие вымывания. Полученные данные подтверждают, что цеолит может быть использован в качестве носителя в составе наноудобрений, обеспечивая целенаправленную и дозированную доставку микроэлементов растениям.

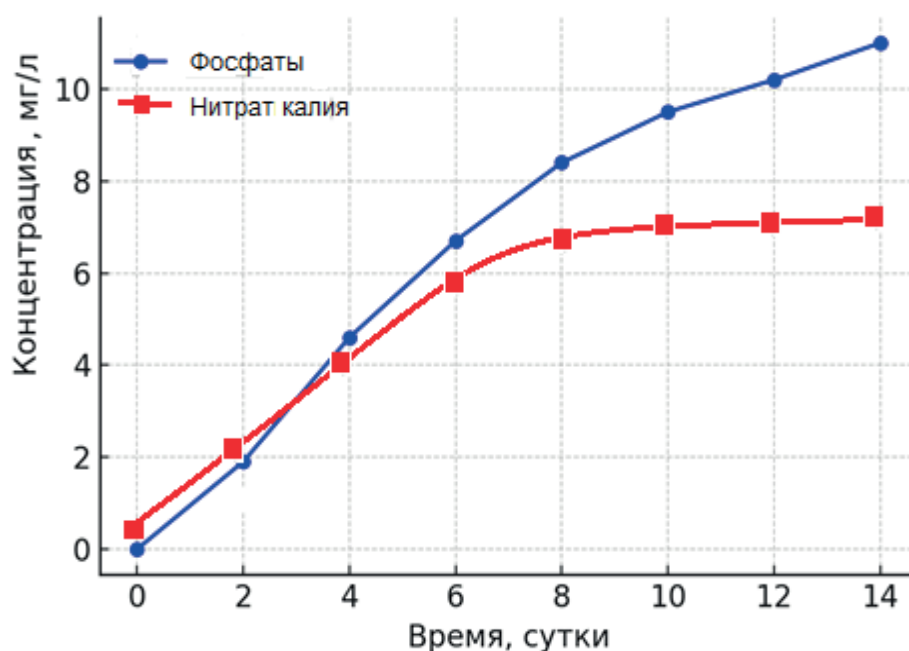


Рисунок 3 – Динамика высвобождения фосфор- и калийсодержащих соединений из модифицированного цеолита

Результаты модификации показали, что наибольшую сорбцию ионов продемонстрировал цеолит, обработанный фосфатами и ионами калия. Высвобождение происходило постепенно, с максимумом в течение 10-14 суток, в зависимости от типа иона условий среды и корневых выделений (органических кислот). Это согласуется с предыдущими исследованиями по медленному высвобождению из цеолитов [12, 13, 14].

Происходит стимулирование биохимических процессов в период прорастания семян, образования корней. В итоге формируется развитая корневая система, проникающая в глубинные слои почвы. Затем увеличивается площадь листовой поверхности, обеспечивая базу для фотосинтеза, способствуя интенсивному нарастанию зелёной массы растения. Вследствие этого увеличивается устойчивость к неблагоприятным климатическим факторам (засухи, низкие температуры), повышается урожайность, ускоряются сроки созревания плодов, а также улучшается их качество, уменьшая количество нитратов и нитритов.

Результаты исследований являются научной основой для разработки рекомендаций по применению наноудобрений, что позволяет в 4-6 раз повысить урожайность растений и обеспечить их высокие пищевые качества. Это приводит при полном цикле обработок к увеличению урожая от 35% и выше, сокращению сроков вегетации, существенному улучшению качества продукции по всем показателям, при сокращении внесения удобрений и пестицидов на 60-70%. Все это превращает наноудобрение из обычного удобрения в биологический защитно-стимулирующий комплекс.

## Закключение

Результаты проведенных исследований подтверждают высокую эффективность природного цеолита в качестве носителя для макро- и микроэлементов при создании наноудобрений. Модифицированный цеолит демонстрирует значительную сорбционную емкость, пролонгированное и контролируемое высвобождение питательных веществ, а также положительное влияние на рост и устойчивость растений в лабораторных условиях. Методики ВЕТ и ААС позволили объективно оценить структурные и функциональные характеристики разработанных систем. Полученные данные подтверждают перспективность использования цеолитовых носителей в устойчивом земледелии и могут служить основой для разработки инновационных агротехнологий с пониженной нагрузкой на окружающую среду.

## Вклад авторов

ГН: формулирование цели исследования, постановка задач, научное руководство и редактирование статьи. ЭА: проведение экспериментальных работ, получение и анализ ИК-спектров и ВЕТ-данных, оформление рукописи статьи. АБ: интерпретация результатов сорбции, обсуждение механизма взаимодействия цеолита с фосфатами, составление списка литературы, подготовка иллюстраций. АӘ: обработка экспериментальных данных, оформление таблиц (сорбция, ВЕТ, ААС), построение графиков.

## Список литературы

- 1 Chen, J., Liu, X., Zheng, J., Zhang, M., Wang, H., Li, Y., Zhao, Q. (2022). Effects of long-term organic and inorganic fertilization on soil microbial community and functional genes: A meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 172, 108741. DOI: 10.1016/j.soilbio.2022.108741.
- 2 Ali, M., Ma, Y., Lu, J., et al. (2021). Chemical Fertilizer Management Practices and Their Effect on Microbial Diversity and Activity in Agricultural Soils: A Meta-analysis. *Agriculture*, 11(7), 615. DOI: 10.3390/agriculture11070615.
- 3 Zhang, Q., Sun, W., Wang, L., Li, H., Chen, X., Zhou, Y. (2023). Legacy of chemical fertilizers on soil health and sustainability in agricultural ecosystems. *Science of The Total Environment*, 866, 161236. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161236.
- 4 Banishwal, AK, Rayalu, SS, Labhasetwar, NK, Devotta, S., Naidu, R. (2006). Surfactant-Modified Zeolite as a Slow Release Fertilizer for Phosphorus. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 4773-4779. DOI: 10.1021/jf060034b.
- 5 Танигути, Н. (ред.). (1996). *Nanotechnology: Integrated Processing Systems for Ultra-precision and Ultra-fine Products*. Oxford: Oxford University Press, 350.
- 6 Gäbler, C., Jeschke, J., Dietrich, S., Nurgazina, G., Schaarschmidt, D., Georgi, C., Schlesinger, M., Mehring, M., Lang, H. (2013). The Effect of PEGylated Dendrimers on the Catalytic Activity and Stability of Palladium Particles in the Suzuki Reaction. *Catalysis Letters*, 143(4), 317-323.
- 7 Нургазина, Г., Ермагамбет, Б., Абылгазина, Л., Козловский, А., Имашева, Б. (2015). Синтез и свойства наночастиц железа. *Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева. Серия техническая*, 6, 75-81.
- 8 Khan, MZH, Islam, MR, Nahar, N., Al-Mamun, M, Khan, MAS, Matin, MA. (2021). Synthesis and characterization of nanozeolite based composite fertilizer for sustainable release and use efficiency of nutrients. *Heliyon*, 7(1), e06091. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e06091.
- 9 Sharma, V., Javed, B., Byrne, H., Curtin J., Tian F. (2022). Zeolites as Carriers of NanoFertilizers: From Structures and Principles to Prospects and Challenges. *Applied Nano Science*, 3(3), 163-186. DOI: 10.3390/applnano3030013.
- 10 Kumari, R. (2024). Effect of Zeolite/Hydroxyapatite Nanofertilizer on Soil Quality, Nutrients Status and Plant Productivity in Solanum melongena. *Current Agriculture Research Journal*, 12(2), 997-1007. DOI: 10.12944/CARJ.12.2.40.
- 11 Ibrahim, HMS, Mahmoud, AWM, Soliman, MM, Heider, SM, Mottaleb, SA. (2024). Assessing biochar, clinoptilolite zeolite and zeo-char loaded nano-nitrogen for boosting growth performance of *Spathiphyllum wallisii*. *BMC Plant Biology*, 924. DOI: 10.1186/s12870-024-05592-6.

12 Prisa, D. (2024). Zeolites synthesized from agro-industrial residues applied in agriculture: A review. *Soil Use and Management*, 40(1). DOI: 10.1111/sum.13003.

13 Fincheira, P., Hoffmann, N., Tortella, G., Ruiz, A., Cornejo, P., Diez, MC, Seabra, AB, Benavides-Mendoza, A., Rubilar, O. (2022). Eco-Efficient Systems Based on Nanocarriers for the Controlled Release of Fertilizers and Pesticides: Toward Smart Agriculture. *Nanomaterials*, 13(13), 1978. DOI: 10.3390/nano13131978.

14 Нургалиева, ДА, Нургазина, ГМ. (2019). Получение экологических наноудобрений для улучшения роста растений. *Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева. Серия техническая*, 3, 121-125.

## References

1 Chen, J., Liu, X., Zheng, J., Zhang, M., Wang, H., Li, Y., Zhao, Q. (2022). Effects of long-term organic and inorganic fertilization on soil microbial community and functional genes: A meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 172, 108741. DOI: 10.1016/j.soilbio.2022.108741.

2 Ali, M., Ma, Y., Lu, J., et al. (2021). Chemical Fertilizer Management Practices and Their Effect on Microbial Diversity and Activity in Agricultural Soils: A Meta-analysis. *Agriculture*, 11(7), 615. DOI: 10.3390/agriculture11070615.

3 Zhang, Q., Sun, W., Wang, L., Li, H., Chen, X., Zhou, Y. (2023). Legacy of chemical fertilizers on soil health and sustainability in agricultural ecosystems. *Science of The Total Environment*, 866, 161236. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161236.

4 Banishwal, AK, Rayalu, SS, Labhasetwar, NK, Devotta, S., Naidu, R. (2006). Surfactant-Modified Zeolite as a Slow Release Fertilizer for Phosphorus. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54, 4773-4779. DOI: 10.1021/jf060034b.

5 Taniguchi, N. (ed.). (1996). *Nanotechnology: Integrated Processing Systems for Ultra-precision and Ultra-fine Products*. Oxford: Oxford University Press, 350.

6 Gäbler, C., Jeschke, J., Dietrich, S., Nurgazina, G., Schaarschmidt, D., Georgi, C., Schlesinger, M., Mehring, M., Lang, H. (2013). The Effect of PEGylated Dendrimers on the Catalytic Activity and Stability of Palladium Particles in the Suzuki Reaction. *Catalysis Letters*, 143(4), 317-323.

7 Nurgazina, G., Ermagambet, B., Abylgazina, L. Kozlovskiy, A., Imasheva, B. (2015). Sintez i svojstva nanochastic zheleza. *Vestnik ENU im. L.N. Gumileva. Seriya tekhnicheskaya*, 6(109), 75-81.

8 Khan, MZH, Islam, MR, Nahar, N., Al-Mamun, M, Khan, MAS, Matin, MA. (2021). Synthesis and characterization of nanozeolite based composite fertilizer for sustainable release and use efficiency of nutrients. *Heliyon*, 7(1), e06091. DOI: 10.1016/j.heliyon.2021.e06091.

9 Sharma, V., Javed, B., Byrne, H., Curtin J., Tian, F. (2022). Zeolites as Carriers of NanoFertilizers: From Structures and Principles to Prospects and Challenges. *Applied Nano Science*, 3(3), 163-186. DOI: 10.3390/applnano3030013.

10 Kumari, R. (2024). Effect of Zeolite/Hydroxyapatite Nanofertilizer on Soil Quality, Nutrients Status and Plant Productivity in Solanum melongena. *Current Agriculture Research Journal*, 12(2), 997-1007. DOI: 10.12944/CARJ.12.2.40.

11 Ibrahim, HMS, Mahmoud, AWM, Soliman, MM, Heider, SM, Mottaleb, SA. (2024). Assessing biochar, clinoptilolite zeolite and zeo-char loaded nano-nitrogen for boosting growth performance of *Spathiphyllum wallisii*. *BMC Plant Biology*, 924. DOI: 10.1186/s12870-024-05592-6.

12 Prisa, D. (2024). Zeolites synthesized from agro-industrial residues applied in agriculture: A review. *Soil Use and Management*, 40(1). DOI: 10.1111/sum.13003.

13 Fincheira, P., Hoffmann, N., Tortella, G., Ruiz, A., Cornejo, P., Diez, MC, Seabra, AB, Benavides-Mendoza, A., Rubilar, O. (2022). Eco-Efficient Systems Based on Nanocarriers for the Controlled Release of Fertilizers and Pesticides: Toward Smart Agriculture. *Nanomaterials*, 13(13), 1978. DOI: 10.3390/nano13131978.

14 Nurgalieva, DA, Nurgazina, GM. (2019). Poluchenie ekologicheskikh nanoudobrenii dlya uluchsheniya rosta rasteniii. *Vestnik ENU im. L.N. Gumileva. Seriya tekhnicheskaya*, 3(128), 121-125.



## Цеолит негізіндегі нанотыңайтқыштарды синтездеу: тәсілі мен сипаттамалары

Нургазина Г.М., Алимкулова Э.Ж., Букеева А.Б., Әшірбек А.Қ.

### Түйін

Алғышарттар мен мақсат. Минералды тыңайтқыштардың қымбаттауы ауыл шаруашылығы өнімдерінің өзіндік құнына әсер етіп, инновациялық агротехнологияларды енгізуді қажет етеді. Бұл мәселенің тиімді шешімдерінің бірі – макро- және микроэлементтерді баяу және ұзақ мерзімді түрде шығаратын, цеолит негізінде дайындалған нанотыңайтқыштарды қолдану. Зерттеудің мақсаты: табиғи цеолитті тасымалдаушы ретінде пайдалана отырып, экологиялық таза нанотыңайтқыштар алу.

Материалдар мен әдістер. Зерттеуде Қазақстаннан алынған табиғи клиноптилолит қолданылып, фосфор, калий және микроэлементтермен (Zn, Cu, Mn) модификацияланды. Физика-химиялық зерттеу әдістері ретінде ИК-спектроскопия, БЭТ беткі аумақты анықтау және атомды-абсорбциялық спекторметрия қолданылды.

Нәтижелер. Цеолиттің қоректік элементтерді сіңіру қабілеті жоғары екендігі және оларды ортаға байланысты біртіндеп шығаратыны анықталды. Биотест нәтижелері өсімдіктердің өсуінің артқанын және қолайсыз жағдайларға төзімділігінің жақсарғанын көрсетті.

Қорытынды. Модификацияланған цеолит негізінде алынған нанотыңайтқыштар экологиялық тұрғыдан қауіпсіз, ұзақ әсер ететін және тұрақты ауыл шаруашылығында қолдануға тиімді.

**Кілт сөздер:** цеолит; нанотыңайтқыш; баяу босату; микроэлемент; ион алмасу; сорбция.

## Synthesis of zeolite-based nanofertilizers: approach and characteristics

Gulnar M. Nurgazina, Elmira Zh. Alimkulova, Akbota B. Bukeeva, Ainur K. Ashirbek

### Abstract

Background and Aim. The rising cost of mineral fertilizers negatively impacts the competitiveness of agricultural production, necessitating innovative technologies. One promising solution is the use of zeolite-based nanofertilizers, which provide gradual and prolonged nutrient release. This study aimed to develop nanofertilizers using natural zeolite as a carrier for macro- and micronutrients.

Materials and methods. Natural clinoptilolite from Kazakhstan was modified with phosphorus, potassium, and trace element compounds (Zn, Cu, Mn). The zeolite samples were characterized using FTIR spectroscopy, BET surface area analysis, and atomic absorption spectroscopy.

Results. The modified zeolites demonstrated high nutrient sorption capacity and stable, environment-dependent nutrient release. Biological tests indicated enhanced plant growth and increased resistance to abiotic stress.

Conclusion. The synthesized nanofertilizer formulations are ecologically safe, provide long-lasting nutrient release, and are effective for sustainable agriculture.

**Keywords:** zeolite; nanofertilizer; slow release; micronutrients; ion exchange; sorption.