

Научная статья

УДК 539-022.532:539.2:575.224.4

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-3-438-446>



## Оценка биобезопасности наноструктурных минералов, разработанных для применения в качестве удобрений

Ирина Александровна Дегтярева, Эдуард Викторович Бабынин,  
Елена Александровна Прищепенко

Татарский научно-исследовательский институт агрохимии и почвоведения – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», г. Казань, Российская Федерация

Автор, ответственный за переписку: Дегтярева Ирина Александровна, [rease-1963@mail.ru](mailto:rease-1963@mail.ru)

**Аннотация.** Природные цеолиты эффективно используются в качестве удобрений, субстратов и носителей для пестицидов, а также сорбентов при восстановлении загрязненных почв. Поскольку наноструктурные минералы обладают уникальными физико-химическими свойствами, прежде чем использовать их на практике, они должны быть проверены на наличие токсичности и генотоксичности. Впервые нами проведена проверка мутагенных и антимутагенных свойств наноструктурной водно-цеолитной суспензии с использованием 2-х бактериальных тест-систем: теста Эймса и SOS-lux теста. Согласно полученным данным, наноструктурная водно-цеолитная суспензия не обладает мутагенной активностью в исследованном диапазоне концентраций (0,75–400 мкг/мл). Для оценки антимутагенной активности наноструктурной водно-цеолитной суспензии выбраны различные типы мутагенов: митомицин С, этилметансульфонат, 2,4-динитрофенилгидразин, а также ДНК-повреждающие агенты – офлоксацин и перекись водорода. Показан значительный антимутагенный эффект наноструктурной водно-цеолитной суспензии в концентрации 200 мкг/мл в отношении митомицина С в SOS-lux тесте (ингибирование мутагенной активности составило 50,0%) и 2,4-динитрофенилгидразина в тесте Эймса (ингибирование – 62,0%). Для остальных мутагенов отмечен слабый антимутагенный эффект (17,0% для этилметансульфоната), а в отношении офлоксацина и перекиси водорода антимутагенный эффект отсутствует. Различия в антимутагенном эффекте можно объяснить тем, что цеолиты отрицательно заряжены, поэтому могут захватывать только положительные (или нейтральные) молекулы. Следовательно, антимутагенный эффект наноструктурной водно-цеолитной суспензии будет зависеть от заряда молекулы мутагена. На основании полученных результатов можно считать наноструктурную водно-цеолитную суспензию безопасной для окружающей среды, что позволяет использовать ее по агропромышленному назначению в качестве удобрения при выращивании сельскохозяйственных культур.

**Ключевые слова:** биобезопасность, минералы, наноструктурная водно-цеолитная суспензия, мутагенные и антимутагенные свойства

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания №FMEG-2021-0003, регистрационный номер 121021600147-1.

**Для цитирования:** Дегтярева И. А., Бабынин Э. В., Прищепенко Е. А. Оценка биобезопасности наноструктурных минералов, разработанных для применения в качестве удобрений // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022. Т. 12. N 3. С. 438–446. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-3-438-446>.

Original article

## Nanostructured minerals developed to be used as fertilizers: biosafety evaluation

Irina A. Degtyareva, Eduard V. Babynin, Elena A. Prishchepenko

Scientific Institution Tatar Scientific Research Institute of Agricultural Chemistry and Soil Science – Subdivision of the Federal State Budgetary Institution of Science «Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences», Kazan, Russian Federation

Corresponding author: Irina A. Degtyareva, peace-1963@mail.ru

**Abstract.** Natural zeolites are effectively used as fertilizers, substrates, and pesticide carriers, as well as sorbents in the remediation of contaminated soils. Since nanostructured minerals exhibit unique physicochemical properties, they must be tested for toxicity and genotoxicity prior to their use in practice. The mutagenic and antimutagenic properties of a nanostructured water-zeolite suspension were first tested using two bacterial test systems: Ames test and SOS-lux test. According to the obtained data, the nanostructured water-zeolite suspension exhibits no mutagenic activity within the analyzed concentration range (0.75–400 µg/mL). In order to assess the antimutagenic activity of the nanostructured water-zeolite suspension, different types of mutagens were selected: mitomycin C, ethyl methanesulfonate, 2,4-dinitrophenylhydrazine, as well as DNA-damaging agents (ofloxacin and hydrogen peroxide). A significant antimutagenic effect of the nanostructured water-zeolite suspension at 200 µg/mL was shown against mitomycin C in the SOS-lux test (50.0% inhibition of mutagenic activity) and 2,4-dinitrophenylhydrazine in the Ames test (62.0% inhibition). For the other mutagens, a weak antimutagenic effect was observed (17.0% for ethyl methanesulfonate), while no antimutagenic effect was reported for ofloxacin and hydrogen peroxide. These differences can be attributed to the negative charge in zeolites, meaning that they can capture only positive (or neutral) molecules. Therefore, the antimutagenic effect of the nanostructured water-zeolite suspension depends on the charge of the mutagen molecule. According to the obtained results, the nanostructured water-zeolite suspension can be considered environmentally friendly, which allows it to be used for agro-industrial purposes as a fertilizer in the production of crops.

**Keywords:** nanostructured water-zeolite suspension, biosafety, minerals, nanostructured water-zeolite suspension, mutagenic properties, antimutagenic properties

**Funding.** The work was carried out within the framework of the state task no. FMEG-2021-0003, registration number 121021600147-1.

**For citation:** Degtyareva I. A., Babynin E. V., Prishchepenko E. A. Nanostructured minerals developed to be used as fertilizers: biosafety evaluation. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(3):438–446. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-3-438-446>.

### ВВЕДЕНИЕ

Наноматериалы обладают уникальными физико-химическими свойствами и представляют собой универсальные каркасы для функционализации биомолекул. По этим причинам в течение последних лет область нанотехнологий вызывает повышенный интерес к науке о растениях, особенно в отношении применения наноматериалов в качестве носителей агрохимикатов или биомолекул, а также огромного потенциала для повышения урожайности сельскохозяйственных культур [1]. Нанотехнологии достаточно широко применяются в сельском хозяйстве. Сообщается как о положительном влиянии наночастиц на рост растений [2], так и об отрицательном эффекте [3]. Потеря плодородия почв из-за интенсивных методов ведения сельского хозяйства компенсируется использованием большого количества удобрений для повышения урожайности выращиваемых

культур. Однако эффективность использования обычных удобрений едва ли превышает 30–40% [4]. Наноудобрения, предотвращая нежелательные потери питательных веществ за счет прямой интернализации растениями, избегают взаимодействия питательных веществ с почвой, водой, воздухом.

Так, применение пористых наноматериалов, таких как цеолиты, глина или хитозан, значительно снижает потери азота за счет регулирования высвобождения в зависимости от потребности и усиления процесса поглощения растениями [5]. Способность цеолитов, обладающих сильной адсорбционной и ионообменной емкостью, в значительной степени используется в сельскохозяйственных, промышленных, экологических и биологических технологиях [6]. Цеолиты характеризуются способностью обратимо терять и получать воду и осуществлять обмен составляющих

катионов без существенных изменений структуры [7]. Природные цеолиты применяют для улучшения структуры почвы, производства кормовых добавок в животноводстве, очистки воды, радиозащиты, изготовления пищевых добавок и т.д. Установлено, что цеолиты повышают эффективность использования удобрений [8].

Однако активное применение нанотехнологий вызывает озабоченность по поводу токсикологических последствий воздействия для нецелевых мишеней. Отмечается, что одни и те же свойства, которые делают наноматериалы настолько уникальными, не гарантируют отсутствие потенциальной токсичности [9]. Широкое использование наночастиц в различных областях приводит к их случайному выбросу в земную, водную и атмосферную среду. Растения являются важным компонентом этих экосистем, и взаимодействие наночастиц приводит к поглощению и накоплению их в биомассе растений и определяет перенос наночастиц в окружающей среде [10]. В организм растений наночастицы могут попадать разными путями, а скорость поглощения зависит от их размера, формы, концентрации и поверхностного заряда [11, 12]. Наночастицы адсорбируются на различных поверхностях растений, и их последующее поглощение происходит через отверстия растений в микрометровом и нанометровом диапазоне. В нескольких работах представлены данные об отсутствии ДНК-повреждающих свойств у нанобентонита и нанофосфорита [13, 14]. Показано наличие у некоторых цеолитсодержащих пород негативных биомедицинских эффектов (цитотоксических, мутагенных, канцерогенных) по отношению к организму человека [15]. Доказано, что мутагенные эффекты обусловлены стимуляцией перекисного окисления липидов [16]. Описан профилактический эффект цеолитов на интоксикацию фосфорорганическими отравлениями [17]. Так, увеличение числа случаев опухолей легких и мезотелиомы наблюдается в длительных ингаляционных исследованиях крыс и хомяков, обработанных микроразмерными огнеупорными керамическими волокнами, содержащими каолин в качестве основного компонента [18]. По мере того, как новые наноматериалы синтезируют с тщательным контролем размеров и свойств поверхности, остается важной оценка их токсичности до применения на практике. Поэтому несомненна важность изучения биобезопасности наноматериалов.

Цель исследования – оценка мутагенных и антимутагенных свойств наноструктурной водно-цеолитной суспензии в бактериальных тестах.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Мутагенная активность наноструктурной водно-цеолитной суспензии исследована в тесте Эймса [19]. Использовали индикаторные штаммы *Salmonella typhimurium* TA1535 (генотип *hisG46, rfa, uvrB*), TA1538 (генотип *hisD3052, rfa, uvrB*). Штамм *S. typhimurium* TA1535 содержит мутации

в гене *hisG*, что приводит к аминокислотной замене лейцина на пролин (мутация замены пары оснований). Штамм *S. typhimurium* TA1538 имеет делецию 1 пары оснований в гене *hisD*, что вызывает мутацию типа сдвига рамки считывания. Это приводит к изменению 2-х аминокислот и появлению стоп-кодона внутри гена. Реверсии к His<sup>+</sup> фенотипу у этих штаммов таким образом требуют различных молекулярных изменений в гене. Для оценки влияния наноструктурной водно-цеолитной суспензии на SOS-ответ использовали индикаторный штамм *S. typhimurium* TAR5, способный к биолюминесценции, в ответ на ДНК-повреждающие агенты. Штамм был получен авторами в результате трансформации штамма *S. typhimurium* TA1535 плазмидой pDEW238. Данная плазида, содержащая *luxCDABE* – оперон под контролем *recA* промотора, предоставлена Rachel Rozen (The Hebrew Unilibrary of Jerusalem, Израиль).

Ночную культуру *S. typhimurium* (10<sup>9</sup> клеток/мл) в 0,015 М фосфатном буфере (pH 7,4) инкубировали с тестируемым соединением в различных концентрациях при температуре 37 °С в течение 90 мин без встряхивания. После инкубации 2,5 мл расплавленного верхнего агара (0,6% агара; 0,6% NaCl; 0,05 мМ L-гистидина; 0,05 мМ биотина; pH 7,4 при 45 °С) добавляли в пробирки, и смесь наносили на минимальную агаризованную среду (1,5% агар, среда Фогеля-Боннера, содержащая 2,0% глюкозы) и инкубировали при температуре 37 °С в течение 66 ч. Затем подсчитывали число колоний His<sup>+</sup> ревертантов, выросших на поверхности агара. В качестве позитивного контроля использовали 2,4-динитрофенилгидразин для штамма TA1538 и этилметансульфонат для TA1535. Все эксперименты проводили в 3-х повторностях.

Для оценки антимутагенного эффекта мутаген и тестируемое соединение вносили в верхний слой агара одновременно. Позитивный и негативный контроли включали в каждый анализ. Расчет антимутагенного эффекта сделан в соответствии с формулой:

$$\text{Антимутагенный эффект} = [M - T/M] \times 100\%,$$

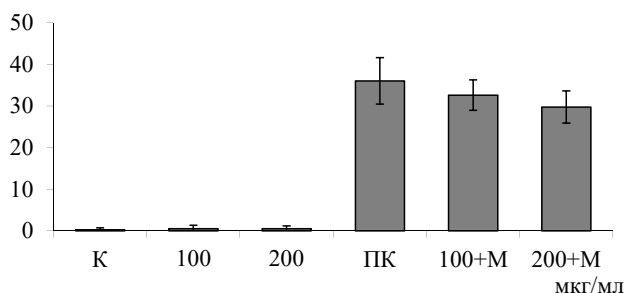
где Т – число ревертантов на чашках в присутствии мутагена и тестируемого соединения; М – число ревертантов на чашках только с мутагеном.

Антимутагенный эффект может быть слабым (менее 25%), умеренным (25–40%) и сильным (более 40%) [20]. Определение мутагенной активности тестируемого вещества с помощью SOS-lux теста выполнено по работе Д. Л. Купера и С. Т. Ловетт [21], антимутагенность рассчитывали по исследованию Г. Кальдини и соавторов [22]. В качестве мутагенов изучали митомицин С, офлоксацин и перекись водорода.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные данные по оценке мутагенных и антимутагенных свойств наноструктурной водно-цеолитной суспензии в тесте Эймса указывают

на то, что тестируемое соединение не повышает ни частоту мутаций замены пар оснований у штамма *S. typhimurium* TA1535, ни типа сдвига рамки считывания у *S. typhimurium* штамма



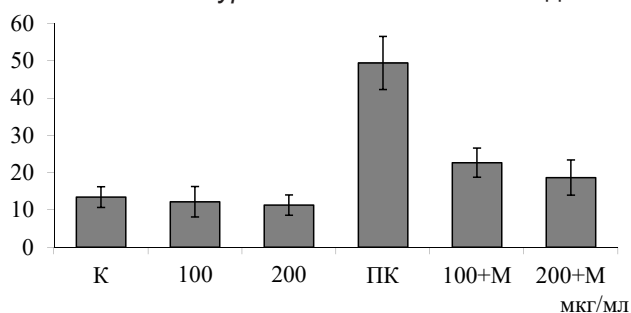
**Рис. 1.** Влияние наноструктурной водно-цеолитной суспензии на число генных мутаций у штамма *S. typhimurium* TA1535. По оси ординат: среднее число His+ – ревертантов на чашку Петри, по оси абсцисс: ПК – позитивный контроль (этилметансульфонат); +M – наноструктурная водно-цеолитная суспензия + этилметансульфонат

**Fig. 1.** Effect of nanostructured water-zeolite suspension on the number of gene mutations in a strain *S. typhimurium* TA1535. Y-axis: average number of His+ revertants per Petri dish; X-axis: PC, positive control (ethyl methanesulfonate); +M – nanostructured water-zeolite suspension + ethyl methanesulfonate

TA1538 (рис.1, 2).

Следовательно, наноструктурная водно-цеолитная суспензия безопасна в использовании, т.к. не проявляет мутагенной активности.

В экспериментах по определению антимутагенной активности тестируемого соединения в тесте Эймса использованы соответствующие для каждого штамма мутагены. В полученных данных выявления антимутагенных свойств наноструктурной водно-цеолитной суспензии (см. рис. 2) со штаммом *S. typhimurium* TA1538 наблюдается



**Рис. 2.** Влияние наноструктурной водно-цеолитной суспензии на число генных мутаций у штамма *S. typhimurium* TA1538. По оси ординат: среднее число His+ – ревертантов на чашку, по оси абсцисс: ПК – позитивный контроль (2,4-динитрофенилгидразин); +M – наноструктурная водно-цеолитная суспензия + 2,4-динитрофенилгидразин

**Fig. 2.** Effect of nanostructured water-zeolite suspension on the number of gene mutations in a strain *S. typhimurium* TA1538. Y-axis: average number of His+ revertants per cup; X-axis: PC, positive control (2,4-dinitrophenylhydrazine); +M – nanostructured water-zeolite suspension + 2,4-dinitrophenylhydrazine

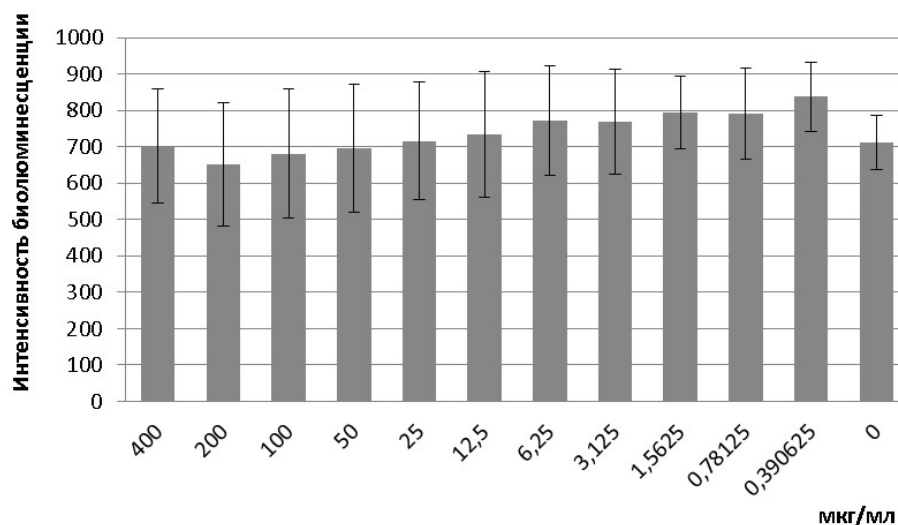
значительный антимутагенный эффект (62,0%), в то время как со штаммом *S. typhimurium* TA1535 – слабый (17,0%), кроме того, различия не достоверные.

Из результатов экспериментов следует, что наноструктурная водно-цеолитная суспензия в тесте Эймса проявляет антимутагенный эффект в отношении 2,4-динитрофенилгидразина, но в отношении этилметансульфоната достоверных отличий не обнаружено.

Следующим этапом являлось исследование биолюминесценции штамма *S. typhimurium* TAR5 в ответ на действие наноструктурной водно-цеолитной суспензии (рис. 3). Если в присутствии исследуемого соединения уровень биолюминесценции возрастает в 2 раза по сравнению с фоновым, вещество можно считать SOS-индуктором, т.е. оно обладает ДНК-повреждающими свойствами. Из результатов экспериментов следует, что наноструктурная водно-цеолитная суспензия при различных концентрациях в диапазоне от 0,75–400,0 мкг/мл не обладает ДНК-повреждающими свойствами.

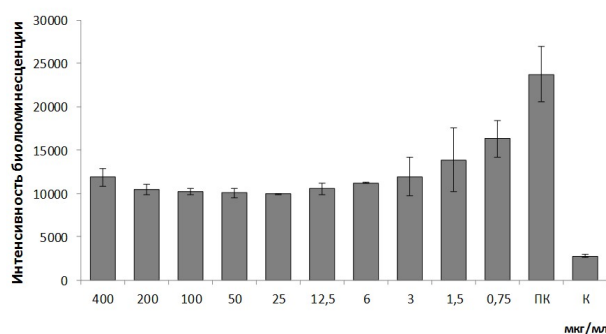
Тем же методом проверены антимутагенные свойства наноструктурной водно-цеолитной суспензии в отношении различных индукторов SOS-ответа, таких как митомицин С, офлоксацин и перекись водорода ( $H_2O_2$ ). Этилметансульфонат производит случайные мутации в генетическом материале путем замены нуклеотидов, обычно путем алкилирования гуанинов с образованием  $O_6$ -этилгуанина. Во время репликации ДНК-полимеразы, которые катализируют этот процесс, часто размещают тимин вместо цитозина напротив  $O_6$ -этилгуанина [23]. Митомицин С – антибиотик, выделенный из *Streptomyces caespitosus*, также классифицируется как алкилирующий агент, но, кроме того, он способен индуцировать меж- и внутринитевые сшивки ДНК [24]. Перекись водорода генерирует гидроксильные радикалы, которые вызывают перекисное окисление липидов, что ведет к индукции разрывов ДНК, а также к окислительным повреждениям ДНК [25]. 2,4-динитрофенилгидразин – производное гидразина, в котором один атом водорода замещен на фенильную группу. Гидразины являются канцерогенами и реагируют с пиримидиновыми основаниями, вызывая потерю пиримидинов или образуя различные аддукты в молекуле ДНК [26]. Фторхинолоны связываются с активным центром бактериальных топоизомераз типа II, что приводит к накоплению в хромосомной ДНК одностранных и двустранных разрывов, которые являются индукторами SOS-ответа [27].

Для выявления возможной антимутагенной активности биосенсорный штамм выращен в присутствии одновременно индуктора SOS-ответа и тестируемого вещества (рис. 4). Наноструктурная водно-цеолитная суспензия проявляет антимутагенный эффект по отношению к митомицину С – степень подавления мутагенной активности составляет 50,0%. Действие наноминерала, вероятно, связано с его способностью адсорбировать мутаген. В экспериментах, где

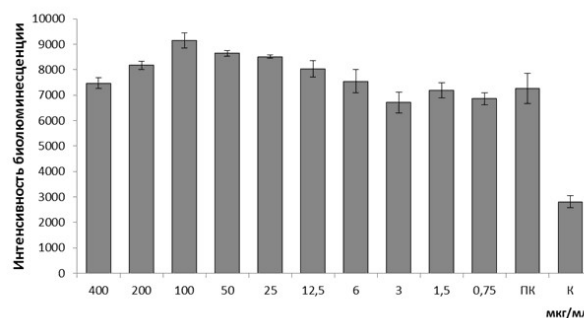


**Рис. 3.** Интенсивность биолюминесценции штамма TAR5 *S. typhimurium* при различных концентрациях наноструктурной водно-цеолитной суспензии

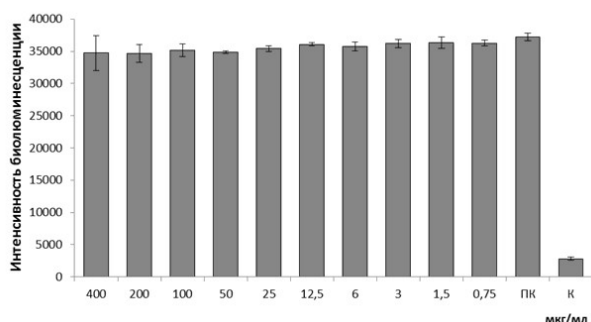
**Fig. 3.** Bioluminescence intensity of the TAR5 strain *S. typhimurium* at different concentrations of nanostructured water-zeolite suspension



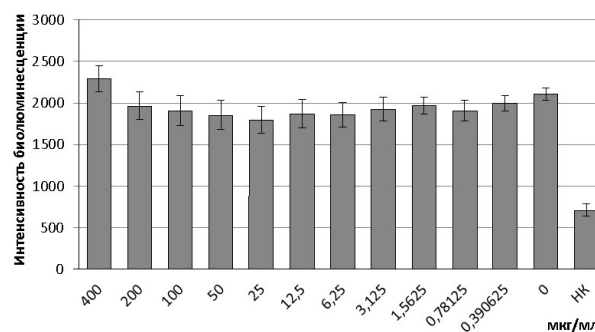
a



b



c



d

**Рис. 4.** Влияние наноструктурной водно-цеолитной суспензии на интенсивность биолюминесценции штамма TAR5 *S. typhimurium*, индуцированной: а – митомицином С; б – перекисью водорода; с – офлоксацином; д – 2,4-динитрофенилгидразином

**Fig. 4.** Effect of nanostructured water-zeolite suspension on the bioluminescence intensity of the TAR5 strain of *S. typhimurium* induced by: а – mitomycin C; б – hydrogen peroxide; с – ofloxacin; д – 2,4-dinitrophenylhydrazine

индукторами SOS-ответа являются  $H_2O_2$ , офлок-сацин и 2,4-динитрофенилгидразин, ингибирование не отмечено. Следовательно, тестируемое соединение не проявляет антимутагенного эффекта.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют об отсутствии мутагенной активности наноструктурной водно-цеолитной суспензии. Кроме того, при совместном инкубировании она проявляет в отношении некоторых мутагенов антимутагенный

эффект, который может зависеть от специфических взаимодействий между наноструктурной водно-цеолитной суспензией и мутагеном.

Таким образом, изучена биобезопасность наноструктурной водно-цеолитной суспензии, которая не проявляет мутагенной активности в исследованиях на бактериальных тест-системах. Поэтому ее можно считать безопасной для окружающей среды и использовать по агропромышленному назначению в качестве компонента для удобрения при выращивании сельскохозяйственных культур.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Khan M. N., Mobin M., Abbas Z. K., AlMutairi K. A., Siddiqui Z. H. Role of nanomaterials in plants under challenging environments // *Plant Physiology and Biochemistry*. 2017. Vol. 110. P. 194–209. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.05.038>.
2. Usman M., Farooq M., Wakeel A., Nawaz A., Cheema S. A., Rehman H. U., et al. Nanotechnology in agriculture: current status, challenges and future opportunities // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 721. P. 137778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137778>.
3. Sanzari I., Leone A., Ambrosone A. Nanotechnology in plant science: to make a long story short // *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2019. Vol. 7. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00120>.
4. van Dijk M., Meijerink G. W. A review of food security scenario studies: gaps and ways forward. In: *The food puzzle: pathways to securing food for all*. Wageningen UR, 2014. P. 30–32.
5. Manjaiah K. M., Mukhopadhyay R., Paul R., Datta S. C., Kumararaja P., Sarkar B. Clay minerals and zeolites for environmentally sustainable agriculture. In: *Modified clay and zeolite nanocomposite materials*. The Netherlands, 2019. P. 309–329. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814617-0.00008-6>.
6. Mumpton F. A. La roca magica: uses of natural zeolites in agriculture and industry // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1999. Vol. 96, no. 7. P. 3463–3470. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.7.3463>.
7. Oliveira C. R., Rubio J. Adsorption of ions onto treated natural zeolite // *Materials Research*. 2007. Vol. 10, no. 4. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392007000400014>.
8. Chinnamuthu C. R., Boopathi P. M. Nanotechnology and agroecosystem // *Madras Agricultural Journal*. 2009. Vol. 96, no. 1-6. P. 17–31.
9. Arora S., Rajwade J. M., Paknikar K. M. Nanotoxicology and in vitro studies: the need of the hour // *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2012. Vol. 258, no. 2. P. 151–165. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2011.11.010>.
10. Lin D., Xing B. Root uptake and phytotoxicity of ZnO nanoparticles // *Environmental Science and Technology*. 2008. Vol. 42, no. 15. P. 5580–5585. <https://doi.org/10.1021/es800422x>.
11. Petushkov A., Ndiege N., Salem A. K., Larsen S. C. Toxicity of silica nanomaterials: zeolites, mesoporous silica, and amorphous silica nanoparticles // *Advances in Molecular Toxicology*. 2010. Vol. 4. P. 223–266. [https://doi.org/10.1016/S1872-0854\(10\)04007-5](https://doi.org/10.1016/S1872-0854(10)04007-5).
12. Tarafdar J. C., Xiang Y., Wang W.-N., Dong Q., Biswas P. Standardization of size, shape and concentration of nanoparticle for plant application // *Applied Biological Research*. 2012. Vol. 14, no. 2. P. 138–144.
13. Дегтярева И. А., Бабынин Э. В., Мотина Т. Ю., Давлетшина А. Я., Яппаров И. А. Оценка мутагенных и антимутагенных свойств наноструктурного фосфорита – компонента комплексного удобрения // *Агрохимический вестник*. 2019. N 1. С. 41–45. <https://doi.org/10.24411/0235-2516-2019-10010>.
14. Degtyareva I. A., Ezhkova A. M., Yapparov A. Kh., Yapparov I. A., Ezhkov V. O., Babynin E. V., et al. Production of nano-bentonite and the study of its effect on mutagenesis in bacteria *Salmonella typhimurium* // *Nanotechnologies in Russia*. 2016. Vol. 11, no. 9-10. P. 663–670. <https://doi.org/10.1134/S1995078016050050>.
15. Дурнев А. Д., Суслова Т. Б., Черемисина З. П., Дубовская О. Ю., Нигарова Э. А., Коркина Л. Г. [и др.]. Исследование мутагенного действия пыли природных цеолитов и хризотил-асбеста // *Экспериментальная онкология*. 1990. Т. 12. N 2. С. 21–24.
16. Ilgren E. B., Brena M. O., Larragoitia J. C., Navarrete G. L., Berna A. F., Krauss E., et al. A reconnaissance study of a potential emerging Mexican mesothelioma epidemic due to fibrous zeolite exposure // *Indoor and Built Environment*. 2008. Vol. 17, no. 6. P. 496–515. <https://doi.org/10.1177/1420326X08096610>.
17. Pavelic K., Hadzija M. Medical applications of zeolites. In: *Handbook of zeolite science and technology*. New York, 2003. P. 1143–1174.
18. Bunn W. B., Bender J. R., Hesterberg T. W., Chase G. R., Konzen J. L. Recent studies of man-made vitreous fibers. Chronic animal inhalation studies // *Journal of Occupational Medicine*. 1993. Vol. 35, no. 2. P. 101–113. <https://doi.org/10.1097/00043764-199302000-00009>.
19. Maron D. M., Ames B. N. Revised methods for the Salmonella mutagenicity test // *Mutation Re-*

search. 1983. Vol. 113, no. 3-4. P. 173–215. [https://doi.org/10.1016/0165-1161\(83\)90010-9](https://doi.org/10.1016/0165-1161(83)90010-9).

20. Evandri M. G., Battinelli L., Daniele C., Mas-trangelo S., Bolle P., Mazzanti G. The antimuta-genic activity of *Lavandula angustifolia* (lavender) essential oil in the bacterial reverse mutation as-say // *Food and Chemical Toxicology*. 2005. Vol. 43, no. 9. P. 1381–1387. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2005.03.013>.

21. Cooper D. L., Lovett S. T. Toxicity and toler-ance mechanisms for azidothymidine, a replication gap-promoting agent, in *Escherichia coli* // *DNA Re-pair (Amst)*. 2011. Vol. 10, no. 3. P. 260–270.

22. Caldini G., Trotta F., Villarini M., Moretti M., Pasquini R., Scassellati-Sforzolini G., et al. Screen-ing of potential lactobacilli antigenotoxicity by mi-crobial and mammalian cell-based tests // *Interna-tional Journal of Food Microbiology*. 2005. Vol. 102, no. 1. P. 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmi-cro.2004.11.015>.

23. Tagu D., Le Trionnaire G., Tanguy S., Gauth-ier J.-P., Huynh J.-R. EMS mutagenesis in the pea aphid *Acyrtosiphon pisum* // *G3 Genes, Genomes*,

*Genetics*. 2014. Vol. 4, no. 4. P. 657–667. <https://doi.org/10.1534/g3.113.009639>.

24. Abraham L. M., Selva D., Casson R., Leibo-vitch I. Mitomycin: clinical applications in ophthalmic practice // *Drugs*. 2006. Vol. 66, no. 3. P. 321–340. <https://doi.org/10.2165/00003495-200666030-00005>.

25. Valverde M., Lozano-Salgado J., Fortini P., Ro-dríguez-Sastre M. A., Rojas E., Dogliotti E. Hydrogen peroxide-induced DNA damage and repair through the differentiation of human adipose-derived mesen-chymal stem cells // *Stem Cells International*. 2018. P. 1615497. <https://doi.org/10.1155/2018/1615497>.

26. Parodi S., De Flora S., Cavanna M., Pino A., Robbiano L., Bennicelli C., et al. DNA-damaging ac-tivity in vivo and bacterial mutagenicity of sixteen hy-drazine derivatives as related quantitatively to their carcinogenicity // *Cancer Research*. 1981. Vol. 41, no. 4. P. 1469–1482.

27. Amarh V., Arthur P. K. DNA double-strand break formation and repair as targets for novel an-tibiotic combination chemotherapy // *Future Sci-ence OA*. 2019. Vol. 5, no. 8. P. FSO411. <https://doi.org/10.2144/fsoa-2019-0034>.

## REFERENCES

1. Khan M. N., Mobin M., Abbas Z. K., AlMutairi K. A., Siddiqui Z. H. Role of nanomaterials in plants un-der challenging environments. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2017;110:194-209. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.05.038>.

2. Usman M., Farooq M., Wakeel A., Nawaz A., Cheema S. A., Rehman H. U., et al. Nanotechnology in agriculture: current status, challenges and future opportunities. *Science of the Total Environment*. 2020;721:137778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137778>.

3. Sanzari I., Leone A., Ambrosone A. Nanotechnology in plant science: to make a long story short. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. 2019;7. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00120>.

4. van Dijk M., Meijerink G. W. A review of food security scenario studies: gaps and ways forward. In: *The food puzzle: pathways to securing food for all*. Wageningen UR; 2014, p. 30-32.

5. Manjaiah K. M., Mukhopadhyay R., Paul R., Datta S. C., Kumararaja P., Sarkar B. Clay minerals and zeolites for environmentally sustainable agricul-ture. In: *Modified clay and zeolite nanocomposite ma-terials*. The Netherlands; 2019, p. 309-329. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814617-0.00008-6>.

6. Mumpton F. A. La roca magica: uses of natural zeolites in agriculture and industry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1999;96(7):3463-3470. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.7.3463>.

7. Oliveira C. R., Rubio J. Adsorption of ions onto treated natural zeolite. *Materials Research*. 2007;10(4). <https://doi.org/10.1590/S1516-14392007000400014>.

8. Chinnamuthu C. R., Boopathi P. M. Nanotechnology and agroecosystem. *Madras Agricultural Journal*. 2009;96(1-6):17-31.

9. Arora S., Rajwade J. M., Paknikar K. M.

Nanotoxicology and in vitro studies: the need of the hour. *Toxicology and Applied Pharmacology*. 2012;258(2):151-165. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2011.11.010>.

10. Lin D., Xing B. Root uptake and phytotoxicity of ZnO nanoparticles. *Environmental Science and Technology*. 2008;42(15):5580-5585. <https://doi.org/10.1021/es800422x>.

11. Petushkov A., Ndiege N., Salem A. K., Larsen S. C. Toxicity of silica nanomaterials: zeolites, mesoporous silica, and amorphous silica nanoparticles. *Advances in Molecular Toxicology*. 2010;4:223-266. [https://doi.org/10.1016/S1872-0854\(10\)04007-5](https://doi.org/10.1016/S1872-0854(10)04007-5).

12. Tarafdar J. C., Xiang Y., Wang W.-N., Dong Q., Biswas P. Standardization of size, shape and concentration of nanoparticle for plant application. *Applied Biological Research*. 2012;14(2):138-144.

13. Degtyareva I. A., Babynin E. V., Motina T. Yu., Davletshina A. Ya., Yapparov I. A. Estimation of mutagenic and antimutagenic properties of nano-structured phosphorus – component of complex fertilizer. *Agrokhimicheskii vestnik = Agrochemical Herald*. 2019;(1):41-45. (In Russian). <https://doi.org/10.24411/0235-2516-2019-10010>.

14. Degtyareva I. A., Ezhkova A. M., Yapparov A. Kh., Yapparov I. A., Ezhkov V. O., Babynin E. V., et al. Production of nano-bentonite and the study of its effect on mutagenesis in bacteria *Salmonella typhimurium*. *Nanotechnologies in Russia*. 2016;11(9-10):663-670. <https://doi.org/10.1134/S1995078016050050>.

15. Durnev A. D., Suslova T. B., Cheremisina Z. P., Dubovskaya O. Yu., Nigarova E. A., Korkina L. G., et al. Study of the mutagenic effect of natural zeolite dust and chrysotile asbestos. *Ekspierimental'naya onkologiya*. 1990;12(2):21-24. (In Russian).

16. Ilgren E. B., Brena M. O., Larragoitia J. C.,

Navarrete G. L., Berna A. F., Krauss E., et al. A reconnaissance study of a potential emerging Mexican mesothelioma epidemic due to fibrous zeolite exposure. *Indoor and Built Environment*. 2008;17(6):496-515. <https://doi.org/10.1177/1420326X08096610>.

17. Pavelic K., Hadzija M. Medical applications of zeolites. In: *Handbook of zeolite science and technology*. New York; 2003, p. 1143-1174.

18. Bunn W. B., Bender J. R., Hesterberg T. W., Chase G. R., Konzen J. L. Recent studies of man-made vitreous fibers. Chronic animal inhalation studies. *Journal of Occupational Medicine*. 1993;35(2):101-113. <https://doi.org/10.1097/00043764-199302000-00009>.

19. Maron D. M., Ames B. N. Revised methods for the Salmonella mutagenicity test. *Mutation Research*. 1983;113(3-4):173-215. [https://doi.org/10.1016/0165-1161\(83\)90010-9](https://doi.org/10.1016/0165-1161(83)90010-9).

20. Evandri M. G., Battinelli L., Daniele C., Mastrangelo S., Bolle P., Mazzanti G. The antimutagenic activity of Lavandula angustifolia (lavender) essential oil in the bacterial reverse mutation assay. *Food and Chemical Toxicology*. 2005;43(9):1381-1387. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2005.03.013>.

21. Cooper D. L., Lovett S. T. Toxicity and tolerance mechanisms for azidothymidine, a replication gap-promoting agent, in *Escherichia coli*. *DNA Repair (Amst)*. 2011;10(3):260-270.

22. Caldini G., Trotta F., Villarini M., Moretti M., Pasquini R., Scassellati-Sforzolini G., et al. Screening

of potential lactobacilli antigenotoxicity by microbial and mammalian cell-based tests. *International Journal of Food Microbiology*. 2005;102(1):37-47. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.11.015>.

23. Tagu D., Le Trionnaire G., Tanguy S., Gauthier J.-P., Huynh J.-R. EMS mutagenesis in the pea aphid *Acyrtosiphon pisum*. *G3 Genes, Genomes, Genetics*. 2014;4(4):657-667. <https://doi.org/10.1534/g3.113.009639>.

24. Abraham L. M., Selva D., Casson R., Leibovitch I. Mitomycin: clinical applications in ophthalmic practice. *Drugs*. 2006;66(3):321-340. <https://doi.org/10.2165/00003495-200666030-00005>.

25. Valverde M., Lozano-Salgado J., Fortini P., Rodriguez-Sastre M. A., Rojas E., Dogliotti E. Hydrogen peroxide-induced DNA damage and repair through the differentiation of human adipose-derived mesenchymal stem cells. *Stem Cells International*. 2018;16:15497. <https://doi.org/10.1155/2018/1615497>.

26. Parodi S., De Flora S., Cavanna M., Pino A., Robbiano L., Bennicelli C., et al. DNA-damaging activity in vivo and bacterial mutagenicity of sixteen hydrazine derivatives as related quantitatively to their carcinogenicity. *Cancer Research*. 1981;41(4):1469-1482.

27. Amarh V., Arthur P. K. DNA double-strand break formation and repair as targets for novel antibiotic combination chemotherapy. *Future Science OA*. 2019;5(8):FSO411. <https://doi.org/10.2144/fsoa-2019-0034>.

## **ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

### **И. А. Дегтярева,**

д.б.н., главный научный сотрудник,  
Татарский научно-исследовательский институт  
агрохимии и почвоведения – обособленное  
структурное подразделение Федерального  
государственного бюджетного учреждения  
науки «Федеральный исследовательский центр  
«Казанский научный центр Российской академии  
наук»,  
420059, г. Казань, ул. Оренбургский тракт, 20А,  
Российская Федерация,  
peace-1963@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-1575-8493>

### **Э. В. Бабынин,**

к.б.н., старший научный сотрудник,  
Татарский научно-исследовательский институт  
агрохимии и почвоведения – обособленное  
структурное подразделение Федерального  
государственного бюджетного учреждения  
науки «Федеральный исследовательский центр  
«Казанский научный центр Российской академии  
наук»,  
420059, г. Казань, ул. Оренбургский тракт, 20А,  
Российская Федерация,  
edward.b67@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-2285-8879>

## **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

### **Irina A. Degtyareva,**

Dr. Sci. (Biology), Chief Researcher,  
Scientific Institution Tatar Scientific  
Research Institute of Agricultural Chemistry  
and Soil Science – Subdivision of the  
Federal State Budgetary Institution  
of Science «Kazan Scientific Center  
of the Russian Academy of Sciences»,  
20A, Orenburg tract St., 420059,  
Kazan, Russian Federation,  
peace-1963@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-1575-8493>

### **Eduard V. Babynin,**

Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher,  
Scientific Institution Tatar Scientific  
Research Institute of Agricultural Chemistry  
and Soil Science – Subdivision of the  
Federal State Budgetary Institution  
of Science «Kazan Scientific Center  
of the Russian Academy of Sciences»,  
20A, Orenburg tract St., 420059,  
Kazan, Russian Federation,  
edward.b67@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-2285-8879>

**Е. А. Прищепенко,**  
к.с.-х.н., руководитель,  
Татарский научно-исследовательский институт  
агрохимии и почвоведения – обособленное  
структурное подразделение Федерального  
государственного бюджетного учреждения  
науки «Федеральный исследовательский центр  
«Казанский научный центр Российской академии  
наук»,  
420059, г. Казань, ул. Оренбургский тракт, 20А,  
Российская Федерация,  
pea77@list.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-9068-3014>

**Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в  
подготовку публикации.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта  
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили  
окончательный вариант рукописи.*

**Информация о статье**

*Поступила в редакцию 15.08.2022.  
Одобрена после рецензирования 14.09.2022.  
Принята к публикации 15.09.2022.*

**Elena A. Prishchepenko,**  
Cand. Sci. (Agriculture), Director,  
Scientific Institution Tatar Scientific  
Research Institute of Agricultural Chemistry  
and Soil Science – Subdivision of the  
Federal State Budgetary Institution  
of Science «Kazan Scientific Center  
of the Russian Academy of Sciences»,  
20A, Orenburg tract St., 420059,  
Kazan, Russian Federation,  
pea77@list.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-9068-3014>

**Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

**Conflict interests**

The authors declare no conflict of interests regarding  
the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved by  
all the co-authors.*

**Information about the article**

*The article was submitted 15.08.2022.  
Approved after reviewing 14.09.2022.  
Accepted for publication 15.09.2022.*