

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2591>
<https://elibrary.ru/MARVUU>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Потенциал совместного применения цеолита и ростостимулирующих бактерий для улучшения роста пшеницы



Н. Н. Богачёва^{ID}, Ю. Е. Афонина^{ID}, Ю. Р. Серазетдинова^{ID},
Д. Е. Колпакова*^{ID}, А. Найк^{ID}, Е. Р. Фасхутдинова^{ID},
Н. А. Любимова, Л. К. Асякина^{ID}

Кемеровский государственный университет^{ROR}, Кемерово, Россия

Поступила в редакцию: 31.05.2025

Принята после рецензирования: 19.06.2025

Принята к публикации: 01.07.2025

*Д. Е. Колпакова: kolpakova1205@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-8508-3372>

Н. Н. Богачёва: <http://orcid.org/0000-0002-4238-5370>

Ю. Е. Афонина: <http://orcid.org/0009-0001-2669-7112>

Ю. Р. Серазетдинова: <https://orcid.org/0000-0002-3044-3529>

А. Найк: <http://orcid.org/0009-0009-9286-4976>

Е. Р. Фасхутдинова: <https://orcid.org/0000-0001-9711-2145>

Л. К. Асякина: <https://orcid.org/0000-0003-4988-8197>

© Н. Н. Богачёва, Ю. Е. Афонина, Ю. Р. Серазетдинова, Д. Е. Колпакова, А. Найк,
Е. Р. Фасхутдинова, Н. А. Любимова, Л. К. Асякина, 2025



Аннотация.

Пшеница (*Triticum aestivum* L.) – основная зерновая культура, обеспечивающая глобальную продовольственную безопасность. Высокие дозы минеральных удобрений и пестицидов приводят к деградации почв и загрязнению окружающей среды. Альтернативой повышения урожайности являются микроорганизмы и природные сорбенты, в частности цеолит, улучшающий структуру почвы, удержание влаги и питательных веществ. Ростостимулирующие бактерии повышают доступность элементов питания для растений и вызывают их рост. Цель исследования – оценка влияния совместного применения цеолита и ростостимулирующих бактерий на рост пшеницы в лабораторных условиях.

Объекты исследования – сорта яровой мягкой пшеницы Сибирский Альянс, Памяти Афродиты, Надежда Кузбасса; ростостимулирующие бактерии (*Azotobacter chroococcum* B-4148, *Azotobacter vinelandii* B-932, *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aurantiaca* B-548) и консорциум на их основе (соотношение 1:3:1). Оценивали солубилизирующую активность штаммов, влияние цеолита (1 т/га) и бактериальных препаратов на показатели роста пшеницы.

Все бактерии солубилизировали цеолит (2,5–17,7 мм). Максимальную активность показал штамм *P. chlororaphis* subsp. *aurantiaca* B-548 (17,7 мм). Совместное применение цеолита и консорциума положительно влияло на рост и развитие всех сортов пшеницы. Лучшие результаты достигнуты при обработке консорциумом с внесением в почву 1 т/га цеолита. Для сорта Сибирский Альянс всхожесть составила 86 %, длина побега – 183 мм, сухая масса – 42,4 %, содержание хлорофилла – 24,47 %, каротиноидов – 16,21 %, азота – 51,83 %. Для сорта Памяти Афродиты всхожесть составила – 80 %, длина побега – 157 мм, сухая масса – 31,3 %, содержание хлорофилла – 32,07 %, содержание каротиноидов – 19,40 %, азота – 59,35 %. Для сорта Надежда Кузбасса всхожесть – 98 %, длина побега – 185 мм, сухая масса – 41,2 %, содержание хлорофилла – 39,74 %, содержание каротиноидов – 28,47 %, азота – 55,26 %.

Полученные результаты подтверждают перспективность использования цеолита и бактерий для улучшения роста пшеницы, что согласуется с данными других исследований о положительном влиянии этих факторов на продуктивность сельскохозяйственных культур. Полученные результаты позволяют рекомендовать использование данного подхода для повышения продуктивности пшеницы, однако необходимы дальнейшие полевые испытания для подтверждения эффективности в производственных условиях.

Ключевые слова. Биоудобрение, зерновая культура, *Triticum aestivum* L., *Azotobacter chroococcum*, *Azotobacter vinelandii*, *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aurantiaca*, цеолит

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Исследование потенциала ростостимулирующих бактерий для повышения агрономической биофортификации пшеницы» (шифр FZSR-2024-0009).

Для цитирования: Богачёва Н. Н., Афонина Ю. Е., Серазетдинова Ю. Р., Колпакова Д. Е., Найк А. и др. Потенциал совместного применения цеолита и ростостимулирующих бактерий для улучшения роста пшеницы. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 3. С. 509–520. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2591>

Combined Use of Zeolite and Growth-Stimulating Bacteria to Improve Wheat Growth



Natalia N. Bogacheva^{ID}, Yulia E. Afonina^{ID}, Yuliya R. Serazetdinova^{ID},
Daria E. Kolpakova*^{ID}, Adarsh Naik^{ID}, Elizaveta R. Faskhutdinova^{ID},
Nadezhda A. Lyubimova, Lyudmila K. Asyakina^{ID}

Kemerovo State University^{ROR}, Kemerovo, Russia

Received: 31.05.2025
Revised: 19.06.2025
Accepted: 01.07.2025

*Daria E. Kolpakova: kolpakova1205@mail.ru,
<https://orcid.org/0000-0002-8508-3372>

Natalia N. Bogacheva: <http://orcid.org/0000-0002-4238-5370>

Yulia E. Afonina: <http://orcid.org/0009-0001-2669-7112>

Yuliya R. Serazetdinova: <https://orcid.org/0000-0002-3044-3529>

Adarsh Naik: <http://orcid.org/0009-0009-9286-4976>

Elizaveta R. Faskhutdinova: <https://orcid.org/0000-0001-9711-2145>

Lyudmila K. Asyakina: <https://orcid.org/0000-0003-4988-8197>

© N.N. Bogacheva, Yu.E. Afonina, Yu.R. Serazetdinova, D.E. Kolpakova, A. Naik,
E.R. Faskhutdinova, N.A. Lyubimova, L.K. Asyakina, 2025



Abstract.

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is the major grain crop that ensures global food security. Intensive farming often involves overuse of mineral fertilizers and pesticides, which leads to soil degradation and environmental pollution. Microorganisms and natural sorbents, e.g., zeolite, offer an alternative solution to the crop yield problem. Zeolite improves the soil structure while helping to retain moisture and nutrients. Growth-stimulating bacteria increase the availability of nutrients for plants and stimulate their growth. This research featured the effect of the combined use of zeolite and bacteria on different wheat varieties and growth indicators in laboratory conditions.

The experiment involved spring wheat varieties of Sibirskiy Alyans, Pamyati Afrodity, and Nadezhda Kuzbassa. The list of growth-stimulating bacteria included *Azotobacter chroococcum* B-4148, *Azotobacter vinelandii* B-932, and *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aurantiaca* B-548, as well as their consortium (1:3:1). The indicators to be checked included the solubilizing activity of the strains and the effect of zeolite (1 t/ha) and bacterial preparations on wheat growth.

All bacteria solubilized zeolite (2.5–17.7 mm). The highest activity belonged to *P. chlororaphis* subsp. *aurantiaca* B-548 (17.7 mm). The combined application of zeolite (1 t/ha) and the bacterial consortium had a positive effect on the growth and development of all wheat varieties. The Sibirskiy Alyans variety showed a germination rate of 86%, a shoot length of 183 mm, a dry weight of 42.4%, a chlorophyll content of 24.47%, a carotenoid content of 16.21%, and a nitrogen concentration of 51.83%. The Pamyati Afrodity variety demonstrated 80% germination rate, 157 mm shoot length, 31.3% dry weight, 32.07% chlorophylls, 19.40% carotenoids, and 59.35% nitrogen. The Nadezhda Kuzbassa variety had 98% germination rate, 185 mm shoot length, 41.2% dry weight, 39.74% chlorophylls, 28.47% carotenoids, and 55.26% nitrogen.

The results confirmed the industrial efficiency of zeolite and bacteria in wheat farming, as did other reports on their positive effect on crop yield. However, further field trials are needed to confirm the results in conditions close to reality.

Keywords. Biofertilizer, grain crop, *Triticum aestivum* L., *Azotobacter chroococcum*, *Azotobacter vinelandii*, *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aurantiaca*, zeolite

Funding. The research was part of State Assignment FZSR-2024-0009: Growth-stimulating bacteria that increase the agronomic biofortification of wheat.

For citation: Bogacheva NN, Afonina YuE, Serazetdinova YuR, Kolpakova DE, Naik A, et al. Combined Use of Zeolite and Growth-Stimulating Bacteria to Improve Wheat Growth. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(3):509–520. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-3-2591>

Введение

Глобальный рост населения обостряет проблему продовольственной безопасности, являющейся ключевым фактором социально-экономического развития любой страны. Мировое потребление продоволь-

ствия определяется демографическими показателями, в то время как объем сельскохозяйственного производства формирует общее предложение продовольствия. Как основополагающий компонент агропромышленного комплекса зерновые культуры представляют

собой ключевой индикатор продовольственной обеспеченности на международном, континентальном и региональном уровнях. Достижение устойчивой продовольственной безопасности предполагает комплексный подход, включающий развитие устойчивых агротехнологий. В частности, необходимо разрабатывать и внедрять инновационные подходы к повышению урожайности и устойчивости основных сельскохозяйственных культур, таких как пшеница [1, 2].

Наиболее актуальным направлением является разработка агробиотехнологий, которые предназначены для возделывания пшеницы (*Triticum aestivum* L.), важнейшей зерновой культуры, занимающей свыше 220 млн га посевных площадей в мире. Мировой валовой сбор пшеницы достигает 808 млн т ежегодно. Рассматриваемая культура позволяет обеспечивать около 20 % суточной потребности человека в калориях и белке [3].

Производство пшеницы сталкивается с существенными вызовами, обусловленными воздействием абиотических и биотических стрессоров. Абиотические факторы (экстремальные температурные режимы, дефицит влаги и засоление почв) оказывают значительное негативное влияние на рост и продуктивность культуры. Биотический стресс включает негативное влияние фитопатогенов и вредителей. Минимизация воздействия данных стрессовых факторов является критически важной для обеспечения продовольственной безопасности и поддержания объемов производства пшеницы на глобальном уровне. Это обуславливает необходимость проведения исследований и разработки агротехнических мероприятий по смягчению негативного влияния стрессоров [4].

В современной сельскохозяйственной практике для повышения урожайности зерновых, особенно пшеницы, широко применяются химические пестициды и стимуляторы роста, которые оказывают неблагоприятное воздействие на окружающую среду [5]. Некоторые препараты, полученные химическим способом, относятся к группе устойчивых и не разрушаются за время одного вегетационного сезона. Из-за неправильного использования эти химикаты попадают в окружающую среду в качестве загрязняющих веществ, что приводит к изменению почвы (pH, засоление, дисбаланс, минерально-органический состав и т. д.) [6, 7]. Пестициды оказывают негативное влияние на видовое разнообразие почвенной микробиоты, что приводит к снижению плодородия почвы, способности минерализации фосфора, железа и т. д. В статье Senabio *et al.* [8] изучено влияние инсектицида (карбофуран) и гербицида (пиклорам) на почвенную микробиоту. Использование данных пестицидов изменило функциональный профиль сообществ: снизилась численность, разнообразие и видовой состав микроорганизмов, что стало причиной значительного ухудшения почвы. Alengebawiy *et al.* [9] пришли к выводу, что чрезмерное использование неорганических удобрений (фосфатные, нитратные и др.)

и пестицидов (инсектициды, гербициды и фунгициды) способствует накоплению тяжелых металлов (кадмий, свинец, медь и цинк) в экосистеме и подавляет жизнедеятельность полезной микробиоты почвы.

Использование синтетических пестицидов и удобрений создает антропогенное загрязнение окружающей среды и вызывает существенные негативные изменения в экологической обстановке. Для решения данной проблемы осуществляют поиск альтернативных безопасных препаратов и удобрений. Например, использование природных минералов – цеолитов [10, 11].

Цеолиты – природные алюмосиликаты, их основные компоненты – диоксид кремния (50–70 %) и оксид алюминия (11–13 %), а также щелочные и щелочно-земельные катионы (Ca^{2+} , Na^+ , K^+ и др.) [12]. Кремний стимулирует защитные механизмы растений к абиотическим (засуха, окисление почв и др.) и биотическим (сорняки, насекомые и т. д.) стрессам. Применение кремниевых удобрений благоприятно влияет на развитие и рост сельскохозяйственных культур [13, 14]. Таким образом природные цеолиты способствуют повышению стрессоустойчивости растений.

Природные цеолиты благодаря своей пористой и кристаллической структуре обладают ионнообменными, катализирующими, влагоудерживающими и адсорбционными свойствами. В связи с этим цеолиты удерживают катионы питательных веществ, таких как калий, кальций, магний и аммоний, предотвращая их вымывание из почвы. Затем они постепенно высвобождают питательные вещества, обеспечивая растения ими по мере необходимости. Это повышает эффективность использования удобрений и снижает затраты на их приобретение. Пористая структура цеолитов позволяет им удерживать значительное количество воды, действуя как резервуар влаги в почве. Это особенно важно в засушливых регионах, где доступность воды является ограничивающим фактором для роста растений [15].

Эти свойства делают цеолиты перспективными для применения в сельском хозяйстве. В исследовании Zheng *et al.* [16] изучено влияние цеолита и фосфатных минеральных удобрений на рост и развитие риса. В результате выявлено, что цеолит способствует усвоению фосфора растениями. Так, содержание фосфора увеличилось на 20,3 и 32,7 % в листьях и стебле соответственно в сравнении с контрольным опытом (без внесения цеолита), потребление рисом воды также увеличилось – на 15,2 % в сравнении с контролем. Куликова и др. [17] изучили влияние цеолита и различных его комбинаций на рост и развитие кукурузы. Цеолит дозой 250 кг/га повысил урожайность зерна на 0,18 т, при дозе 500 кг/га – на 0,78 т в сравнении с контролем без минерала. Использование цеолита, внутри которого индуцированы аминокислоты и карбид, повысило урожайности кукурузы до 2 т/га.

Chamani *et al.* [18] изучили влияние цеолита и биодобрения на урожайность и усвоение питательных

веществ в зерне двух сортов кукурузы (св. 6010 и ns 71). Максимальная урожайность семян (4,48 т/га) получена при внесении цеолита с *Bacillus* sp. и арбускулярными микоризными грибами по сравнению с раздельным их использованием (в данных вариантах урожайность снизилась на 31,2 %). В исследовании Degtyareva and Kirillova [19] также проводилась оценка влияния биоудобрений с цеолитом на урожайность и микробиоценоз гречихи. Урожайность гречихи в вариантах с цеолитом (размер частиц 0,04 мм) и минеральными удобрениями была в 1,3 и 1,8 раза выше, чем в контроле. В течение вегетационного периода в вариантах с консорциумом микроорганизмов отмечалась высокая дыхательная активность почвенной микробиоты.

Цеолит способствует повышению водоудерживающей способности, что улучшает физические свойства почвы. Это приводит к увеличению почвенной микробиоты и биологической активности почвы. Цеолит помогает увеличить урожайность на 2–3 года [20].

Исламгулов с соавторами установили, что внесение природного цеолита способствует улучшению агрохимических свойств чернозема и значительному повышению продуктивности озимой ржи и вико-овсяной смеси. Так, при внесении 15 т/га цеолита корневая растительная масса озимой ржи увеличилась на 70,6 % в сравнении с контролем, при 20 т/га – на 100,0 %; при 25 т/га – на 207,4 % [21]. Дегтярева и др. провели эксперимент с семенами рапса (сорт Набат) и комплексным удобрением, состоящим из природного цеолита и микробиологического консорциума. В состав консорциума вошли следующие микроорганизмы: *Azotobacter chroococcum*, *Pseudomonas brassica-cearum*, *Sphingobacterium multivorum*, *Achromobacter xylosoxidans*. После обработанные семена посеяли в сосуды Вагнера. Комплексное удобрение на основе цеолита благоприятно повлияло на семена рапса, увеличив их массу на 6,63 г/сосуд в сравнении с контрольным опытом. Это на 41,7 % больше контроля (обработка водой). Также результаты эксперимента говорят о том, что данное удобрение может подавлять рост фитопатогенных грибов *Fusarium*, которые появились на начальной фазе онтогенеза и не обнаружены в фазе спелости ярового рапса [22].

Применение цеолита в качестве удобрения для сельскохозяйственных почв увеличивает поглощение азота,

калия и фосфора, что в дальнейшем при выращивании кукурузы улучшает ее показатели роста, т. к. потребление данных микро- и макроэлементов происходит на постоянной основе [23].

При внесении цеолита в почву повышается развитие ризосферных микроорганизмов. Более эффективно действует цеолит, обогащенный аминокислотами, способствует усилению работы местной микробиоты, преобразующей азот из труднодоступных (органических) форм в растворимые, доступные для питания растений [24].

Таким образом, использование цеолита в сельском хозяйстве положительно влияет на урожайность и плодородие почвы. Он используется в борьбе с загрязнением почвы тяжелыми металлами и химическими веществами, для удержания влаги, улучшения питания растений необходимыми веществами (например калий, натрий, фосфор), нормализации pH почвы. Совместное использование цеолита и микроорганизмов в качестве комплексного удобрения положительно влияет на рост и развитие растений. Цеолит, обладая пролонгирующим действием, высвобождает питательные вещества, которые необходимы для активной жизнедеятельности почвенной микробиоты, помогающей злаковым растениям получать полноценное почвенное питание.

Цель исследования – оценить влияние цеолита в сочетании с ростостимулирующими бактериями *A. chroococcum*, *Azotobacter vinelandii* и *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aurantiaca* на рост и развитие семян яровой мягкой пшеницы в лабораторных условиях.

Объекты и методы исследования

Объекты исследования – семена яровой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) сортов Сибирский Альянс (рис. 1а), Памяти Афродиты (рис. 1б) и Надежда Кузбасса (рис. 1с), предоставленные Кемеровским научно-исследовательским институтом сельского хозяйства – филиалом Сибирского федерального научного центра агробиотехнологии РАН (г. Кемерово).

В том числе использовали бактериальные штаммы (*Azotobacter chroococcum* B-4148, *Azotobacter vinelandii* B-932 и *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aurantiaca* B-548) и консорциум на их основе (соотношение микроорганизмов 1:3:1), изученные на предыдущем этапе работы [25].



Рисунок 1. Семена яровой мягкой пшеницы сортов: а – Сибирский Альянс, б – Памяти Афродиты, с – Надежда Кузбасса

Figure 1. Seeds of spring wheat varieties: a – Sibirskiy Alyans, b – Pamyati Afrodity, c – Nadezhda Kuzbassa

Для определения способности микроорганизмов к солюбилизации цеолита использовали методику, описанную в работе Bist *et al.* [26]. Суточные культуры исследуемых бактерий высевали уколом на среду следующего состава, г/л: глюкоза (ChemExpress, Россия) – 20,0; пептон (ЛенРеактив, Россия) – 1,0; дрожжевой экстракт (ЛенРеактив, Россия) – 1,0; аммония сульфат (ЛенРеактив, Россия) – 0,5; магния хлорид (ХимЭкспресс, Россия) – 0,1; железа (III) хлорид (ЛенРеактив, Россия) – 0,01; бактериологический агар (Himmag, Россия) – 20,0. И цеолит – содержание 0,25 %. Культивировали в термостате ТСО–1/80 СПУ (Смоленское СКТБ СПУ, Россия) при температуре 28 ± 2 °C в течение 7 суток. Вокруг бактерий, способных солюбилизировать цеолит, наблюдалась зона просветления (гало-зона). С целью количественного выражения результатов эксперимента измеряли диаметр колонии и гало-зоны и рассчитывали диаметр растворения цеолита по формуле 1:

$$D_{\text{сц}} = D_{\text{к+а}} + D_{\text{к}} \quad (1)$$

где $D_{\text{сц}}$ – диаметр зоны солюбилизации цеолита, мм; $D_{\text{к+а}}$ – диаметр колонии с гало-зоной, мм; $D_{\text{к}}$ – диаметр колонии, мм.

Лабораторную апробацию бактериальных штаммов и консорциума проводили в соответствии с методикой, описанной в раннее опубликованной работе Faskhudinova *et al.* [27]. Варианты обработки семян пшеницы представлены в таблице 1.

Определение всхожести (X, %) проводили на 7 суток в соответствии с ГОСТ 12038-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Метод определения всхожести» по формуле 2:

$$X = \frac{C_{\text{вс}}}{C_{\text{пос}}} \times 100 \quad (2)$$

где $C_{\text{вс}}$ – количество всходов, шт.; $C_{\text{пос}}$ – количество посаженных семян, шт.

Для изучения влияния каждого варианта обработки измеряли параметры роста (длину) и сухой вес назем-

ной части пшеницы. Длину побега пшеницы измеряли на миллиметровой бумаге с точностью до 0,5 мм.

Определение хлорофилла и каротиноидов в наземной части растения проводили с использованием спектрофотометрического анализа согласно методике, описанной в исследовании Серазетдиновой с соавторами [28]. Для этого измельченную наземную часть экстрагировали 50 мл 70 % этанолом на водяной бане и фильтровали. К 4 мл полученного экстракта добавляли 21 мл 96 % этилового спирта. Затем поглощение пигмента измеряли спектрофотометрически при 667 и 480 нм (общий хлорофилл и каротиноиды соответственно).

Содержание азота и белка в наземной части растений определяли на анализаторе азота и белка Rapid N Cube (Elementar, Германия) согласно технической документации к оборудованию.

Исследования проводились в трехкратной повторности. Полученные значения данных были выражены как среднее значение трех измерений со стандартным отклонением. Для статистического анализа использовались Microsoft Office Excel 2007 и одновыборочный парный *t*-критерий Стьюдента для каждой пары [29]. Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Результаты и их обсуждение

Все исследуемые штаммы солюбилизировали фосфаты и продуцировали АСС-деаминазу, гиббереллиновую кислоту, сидерофоры. Также обладали азотфиксирующей способностью и высокой антагонистической активностью в отношении фитопатогенов [25].

Результаты исследования способности штаммов солюбилизировать цеолит представлены на рисунке 2 и в таблице 2.

Все бактериальные культуры продемонстрировали потенциал к солюбилизации цеолита в диапазоне от 2,5 до 17,7 мм. Штамм *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aurantiaca* B-548 обладал наилучшей способностью к солюбилизации цеолита (17,7 мм). Наименьшую способность к переводу цеолита в биодоступную форму проявил штамм *Azotobacter chroococcum* B-4148 (2,5 мм).

Таблица 1. Варианты обработки семян яровой мягкой пшеницы

Table 1. Variants of experimental processing

Опыт	Описание
Вариант 1.1	Обработка дистиллированной водой
Вариант 1.2	Внесение в почву 15 т/га цеолита
Вариант 2.1	Обработка штаммом <i>Azotobacter chroococcum</i> B-4148
Вариант 2.2	Обработка штаммом <i>Azotobacter vinelandii</i> B-932
Вариант 2.3	Обработка штаммом <i>Pseudomonas chlororaphis</i> subsp. <i>aurantiaca</i> B-548
Вариант 2.4	Обработка консорциумом (соотношение микроорганизмов 1:3:1)
Вариант 3.1	Обработка штаммом <i>Azotobacter chroococcum</i> B-4148 с внесением в почву 1 т/га цеолита
Вариант 3.2	Обработка штаммом <i>Azotobacter vinelandii</i> B-932 с внесением в почву 1 т/га цеолита
Вариант 3.3	Обработка штаммом <i>Pseudomonas chlororaphis</i> subsp. <i>aurantiaca</i> B-548 с внесением в почву 1 т/га цеолита
Вариант 3.4	Обработка консорциумом с внесением в почву 1 т/га цеолита

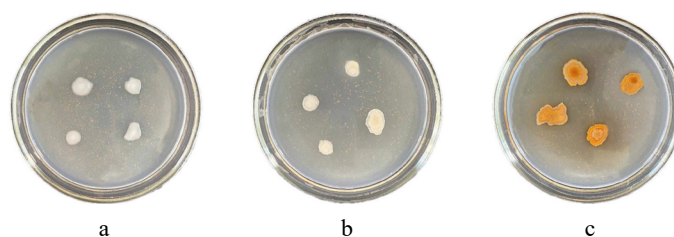


Рисунок 2. Способность бактериальных культур солюбилизовать цеолит: а – *Azotobacter chroococcum* B-4148; б – *Azotobacter vinelandii* B-932; в – *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aurantiaca* B-548

Figure 2. Ability of bacterial cultures to solubilize zeolite: a – *Azotobacter chroococcum* B-4148; b – *Azotobacter vinelandii* B-932; c – *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aurantiaca* B-548

Таблица 2. Результаты способности штаммов солюбилизовать цеолит

Table 2. Zeolite-solubilizing results for each strain

Исследуемый штамм	Солюбилизация цеолита (гало-зона), мм
<i>Azotobacter chroococcum</i> B-4148	2,5 ± 0,5
<i>Azotobacter vinelandii</i> B-932	4,0 ± 0,4
<i>Pseudomonas chlororaphis</i> subsp. <i>aurantiaca</i> B-548	17,7 ± 3,8

Полученные данные согласуются с результатами других исследователей. Так, Hindersah *et al.* [30] провели лабораторный эксперимент для оценки популяции *Azotobacter* и других микроорганизмов в твердом биодобрении с несколькими концентрациями цеолита. Более высокая популяция видов бактерий была в биодобрении, содержащем по 5 % цеолита и жидкого инокулянта. В исследовании Salamatpour *et al.* внесение в почву *Azospirillum*, *Azotobacter* и нано-кремния улучшило агрономические характеристики, урожайность и усвоение питательных веществ в зерне риса [31].

В таблице 3 представлены результаты оценки способности штаммов и консорциума стимулировать рост и развитие яровой мягкой пшеницы сорта Сибирский Альянс в лабораторных условиях.

Применение совместной обработки микроорганизмами, консорциумом и внесением цеолита в почву продемонстрировало положительное влияние на яровую мягкую пшеницу сорта Сибирский Альянс в сравнении с контрольными образцами.

Всхожесть варьировалась в диапазоне 76–94 %. Наилучшую всхожесть показали варианты 2.2 (обработка штаммом *Azotobacter vinelandii* B-932 – 94 %) и 3.4 (обработка консорциумом с внесением в почву 1 т/га цеолита – 86 %) в сравнении с водой (78 %) и цеолитом (76 %). В вариантах с цеолитом показатель всхожести был на 5 % ниже, чем в образцах, обработанных микроорганизмами и консорциумом.

Средняя длина и сухая масса ростка варьировались от 178 до 200 мм и от 39,0 до 58,6 мг соответственно. Вариант обработки штаммом *A. chroococcum* B-4148 с внесением в почву 1 т/га цеолита показал наилучшие результаты по данным показателям (200 мм и 58,6 мг соответственно).

Результаты исследования способности штаммов и консорциума стимулировать рост и развитие яровой мягкой пшеницы сорта Памяти Афродиты в лабораторных условиях представлены в таблице 4.

Наибольшей эффективностью обладал штамм *A. vinelandii* B-932. Варианты 2.2 (обработка *A. vinelandii* B-932) и 3.2 (штамм *A. vinelandii* B-932 и внесение в почву цеолита), которыми обработана яровая мягкая пшеница сорта Памяти Афродиты, имели среднюю длину ростка 194 и 198 мм соответственно, также обработка почвы цеолитом (вариант 1.2.) показала отличный результат, где средняя длина ростка составила 210 мм.

Наибольшая всхожесть наблюдалась в варианте 2.3 (обработка семян штаммом *P. chlororaphis* subsp. *aurantiaca* B-548) – 84 %, наименьшая – в вариантах 2.1 и 3.1.

Вариант обработки штаммом *A. vinelandii* B-932 с внесением в почву 1 т/га цеолита показал наилучшие результаты по средней длине и сухой массе ростка (198 мм и 62,1 мг соответственно).

Результаты исследования способности штаммов и консорциума стимулировать рост и развитие яровой мягкой пшеницы сорта Надежда Кузбасса в лабораторных условиях представлены в таблице 5.

При обработке пшеницы сорта Надежда Кузбасса наибольшей эффективностью обладало совместное использование консорциума с внесением цеолита в почву (вариант 3.4). Данный вариант имел всхожесть 98 %, среднюю длину и сухую массу ростка – 185 мм и 41,2 мм.

Результаты анализа содержания азота, общего хлорофилла и каротиноидов представлены в таблице 6. Для яровой мягкой пшеницы сорта Сибирский Альянс

Таблица 3. Лабораторная апробация консорциума и штаммов, входящих в его состав, на яровую мягкую пшеницу сорта Сибирский Альянс

Table 3. Effect of bacterial consortium and separate strains on Sibirskiy Alyans spring wheat variety

Опыт	Всхожесть, %	Средняя длина ростка, мм	Средняя сухая масса одного ростка, мг
Вариант 1.1	78 ± 1	181 ± 1	39,0 ± 1,4
Вариант 1.2	76 ± 2 $T_{st1} = 1,6; p \leq 0,05$	187 ± 5 $T_{st1} = 2,0; p \leq 0,05$	40,5 ± 1,7 $T_{st1} = 1,2; p \leq 0,05$
Вариант 2.1	80 ± 2 $T_{st1} = 1,6; p \leq 0,05$	178 ± 2 $T_{st1} = 2,3; p \leq 0,05$	30,2 ± 1,2 $T_{st1} = 8,3; p \leq 0,05$
Вариант 2.2	94 ± 3 $T_{st1} = 8,8; p \leq 0,05$	178 ± 3 $T_{st1} = 0,1; p \leq 0,05$	27,5 ± 1,0 $T_{st1} = 11,6; p \leq 0,05$
Вариант 2.3	86 ± 1 $T_{st1} = 12,6; p \leq 0,05$	183 ± 5 $T_{st1} = 0,7; p \leq 0,05$	41,2 ± 1,0 $T_{st1} = 2,2; p \leq 0,05$
Вариант 2.4	81 ± 1 $T_{st1} = 3,7; p \leq 0,05$	194 ± 5 $T_{st1} = 4,4; p \leq 0,05$	54,4 ± 1,5 $T_{st1} = 13,0; p \leq 0,05$
Вариант 3.1	80 ± 2 $T_{st1} = 1,6; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 2,5; p \leq 0,05$	200 ± 4 $T_{st1} = 8,0; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 3,5; p \leq 0,05$	58,6 ± 1,8 $T_{st1} = 15,0; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 12,7; p \leq 0,05$
Вариант 3.2	76 ± 2 $T_{st1} = 1,6; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 0; p \leq 0,05$	199 ± 6 $T_{st1} = 5,1; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 2,7; p \leq 0,05$	58,2 ± 2,2 $T_{st1} = 12,8; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 11,1; p \leq 0,05$
Вариант 3.3	78 ± 1 $T_{st1} = 0; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 1,6; p \leq 0,05$	183 ± 4 $T_{st1} = 0,8; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 1,1; p \leq 0,05$	40,0 ± 1,7 $T_{st1} = 1,1; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 0,4; p \leq 0,05$
Вариант 3.4	86 ± 1 $T_{st1} = 12,6; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 8,6; p \leq 0,05$	183 ± 4 $T_{st1} = 0,8; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 1,1; p \leq 0,05$	42,4 ± 1,2 $T_{st1} = 3,2; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 1,6; p \leq 0,05$

Примечание: T_{st1} – сравнение с дистиллированной водой (вариант 1.1); T_{st2} – сравнение с внесением в почву 15 т/га цеолита (вариант 1.2).

Note: T_{st1} – vs. distilled water (Variant 1.1); T_{st2} – vs. 15 t/ha zeolite in soil (Variant 1.2).

Таблица 4. Лабораторная апробация консорциума и штаммов, входящих в его состав, на яровую мягкую пшеницу сорта Памяти Афродиты

Table 4. Effect of bacterial consortium and separate strains on Pamyati Afrodity spring wheat variety

Опыт	Всхожесть, %	Средняя длина ростка, мм	Средняя сухая масса одного ростка, мг
Вариант 1.1	74 ± 2	186 ± 1	54,2 ± 1,6
Вариант 1.2	74 ± 3 $T_{st1} = 0; p \leq 0,05$	210 ± 4 $T_{st1} = 10,1; p \leq 0,05$	64,2 ± 1,8 $T_{st1} = 7,2; p \leq 0,05$
Вариант 2.1	66 ± 2 $T_{st1} = 4,9; p \leq 0,05$	176 ± 3 $T_{st1} = 5,5; p \leq 0,05$	41,2 ± 1,3 $T_{st1} = 10,9; p \leq 0,05$
Вариант 2.2	76 ± 3 $T_{st1} = 1,0; p \leq 0,05$	194 ± 2 $T_{st1} = 6,2; p \leq 0,05$	61,8 ± 1,3 $T_{st1} = 6,4; p \leq 0,05$
Вариант 2.3	84 ± 4 $T_{st1} = 3,9; p \leq 0,05$	170 ± 1 $T_{st1} = 19,8; p \leq 0,05$	40,5 ± 1,1 $T_{st1} = 12,2; p \leq 0,05$
Вариант 2.4	80 ± 3 $T_{st1} = 2,9; p \leq 0,05$	189 ± 4 $T_{st1} = 1,3; p \leq 0,05$	60,3 ± 1,0 $T_{st1} = 5,6; p \leq 0,05$
Вариант 3.1	66 ± 3 $T_{st1} = 3,8; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 3,3; p \leq 0,05$	179 ± 2 $T_{st1} = 5,4; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 12,0; p \leq 0,05$	42,7 ± 1,3 $T_{st1} = 9,7; p \leq 0,0$ $T_{st2} = 16,8; p \leq 0,055$
Вариант 3.2	72 ± 2 $T_{st1} = 1,2; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 1,0; p \leq 0,05$	198 ± 2 $T_{st1} = 9,3; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 4,7; p \leq 0,05$	62,1 ± 1,2 $T_{st1} = 7,0; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 1,7; p \leq 0,05$
Вариант 3.3	78 ± 1 $T_{st1} = 3,1; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 2,2; p \leq 0,05$	181 ± 3 $T_{st1} = 2,7; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 10,5; p \leq 0,05$	50,7 ± 1,5 $T_{st1} = 2,8; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 10,0; p \leq 0,05$
Вариант 3.4	80 ± 3 $T_{st1} = 1,5; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 1,4; p \leq 0,05$	157 ± 1 $T_{st1} = 35,8; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 22,3; p \leq 0,05$	31,3 ± 1,1 $T_{st1} = 20,4; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 27,2; p \leq 0,05$

Примечание: T_{st1} – сравнение с дистиллированной водой (вариант 1.1); T_{st2} – сравнение с внесением в почву 15 т/га цеолита (вариант 1.2).

Note: T_{st1} – vs. distilled water (Variant 1.1); T_{st2} – vs. 15 t/ha zeolite in soil (Variant 1.2).

Таблица 5. Лабораторная апробация консорциума и штаммов, входящих в его состав, на яровую мягкую пшеницу сорта Надежда Кузбасса

Table 5. Effect of bacterial consortium and separate strains on Nadezhda Kuzbassa spring wheat variety

Опыт	Всхожесть, %	Средняя длина ростка, мм	Средняя сухая масса одного ростка, мг
Вариант 1.1	88 ± 2	165 ± 1	34,3 ± 1,1
Вариант 1.2	86 ± 4 $T_{st1} = 0,8; p \leq 0,05$	202 ± 2 $T_{st1} = 28,7; p \leq 0,05$	51,1 ± 1,3 $T_{st1} = 17,1; p \leq 0,05$
Вариант 2.1	80 ± 1 $T_{st1} = 6,2; p \leq 0,05$	174 ± 2 $T_{st1} = 7,0; p \leq 0,05$	39,8 ± 1,7 $T_{st1} = 4,7; p \leq 0,05$
Вариант 2.2	82 ± 2 $T_{st1} = 3,7; p \leq 0,05$	186 ± 1 $T_{st1} = 25,9; p \leq 0,05$	42,2 ± 1,0 $T_{st1} = 9,3; p \leq 0,05$
Вариант 2.3	86 ± 3 $T_{st1} = 1,0; p \leq 0,05$	185 ± 4 $T_{st1} = 8,4; p \leq 0,05$	40,2 ± 1,4 $T_{st1} = 7,5; p \leq 0,05$
Вариант 2.4	82 ± 1 $T_{st1} = 4,7; p \leq 0,05$	186 ± 5 $T_{st1} = 7,1; p \leq 0,05$	42,4 ± 1,2 $T_{st1} = 8,7; p \leq 0,05$
Вариант 3.1	88 ± 4 $T_{st1} = 0; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 0,6; p \leq 0,05$	184 ± 3 $T_{st1} = 10,4; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 8,7; p \leq 0,05$	38,4 ± 1,2 $T_{st1} = 4,4; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 12,5; p \leq 0,05$
Вариант 3.2	88 ± 3 $T_{st1} = 0; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 0,7; p \leq 0,05$	184 ± 3 $T_{st1} = 10,4; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 8,7; p \leq 0,05$	38,9 ± 1,5 $T_{st1} = 4,3; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 10,7; p \leq 0,05$
Вариант 3.3	96 ± 2 $T_{st1} = 4,9; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 3,9; p \leq 0,05$	168 ± 2 $T_{st1} = 2,3; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 20,9; p \leq 0,05$	39,0 ± 1,3 $T_{st1} = 4,8; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 11,4; p \leq 0,05$
Вариант 3.4	98 ± 1 $T_{st1} = 7,8; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 5,0; p \leq 0,05$	185 ± 1 $T_{st1} = 24,7; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 13,2; p \leq 0,05$	41,2 ± 1,6 $T_{st1} = 6,2; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 8,3; p \leq 0,05$

Примечание: T_{st1} – сравнение с дистиллированной водой (вариант 1.1); T_{st2} – сравнение с внесением в почву 15 т/га цеолита (вариант 1.2).Note: T_{st1} – vs. distilled water (Variant 1.1); T_{st2} – vs. 15 t/ha zeolite in soil (Variant 1.2).

Таблица 6. Результаты исследования влияния штаммов и консорциума на показатели роста зерновых культур со стандартной планкой погрешности

Table 6. Effect of strains and their consortium on growth indicators across wheat varieties, standard error bar

Опыт	Хлорофилл, %	Каротиноиды, %	Содержание азота, мг/г
Яровая мягкая пшеница сорта Сибирский Альянс			
Вариант 1.1	11,85 ± 0,47	10,60 ± 0,42	46,03 ± 1,84
Вариант 1.2	12,78 ± 0,38 $T_{st1} = 2,7; p \leq 0,05$	8,81 ± 0,26 $T_{st1} = 6,4; p \leq 0,05$	45,97 ± 1,38 $T_{st1} = 0,1; p \leq 0,05$
Вариант 2.1	15,90 ± 0,64 $T_{st1} = 9,0; p \leq 0,05$	11,02 ± 0,44 $T_{st1} = 1,2; p \leq 0,05$	46,99 ± 1,88 $T_{st1} = 0,6; p \leq 0,05$
Вариант 2.2	13,37 ± 0,40 $T_{st1} = 4,3; p \leq 0,05$	11,89 ± 0,36 $T_{st1} = 4,2; p \leq 0,05$	47,88 ± 1,44 $T_{st1} = 1,4; p \leq 0,05$
Вариант 2.3	13,68 ± 0,55 $T_{st1} = 4,5; p \leq 0,05$	11,12 ± 0,44 $T_{st1} = 1,5; p \leq 0,05$	46,84 ± 1,87 $T_{st1} = 0,5; p \leq 0,05$
Вариант 2.4	19,20 ± 0,58 $T_{st1} = 17,1; p \leq 0,05$	12,46 ± 0,37 $T_{st1} = 5,8; p \leq 0,05$	48,29 ± 1,45 $T_{st1} = 0,5; p \leq 0,05$
Вариант 3.1	19,27 ± 0,77 $T_{st1} = 12,4; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 13,12; p \leq 0,05$	12,77 ± 0,51 $T_{st1} = 5,7; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 12,0; p \leq 0,05$	48,43 ± 1,94 $T_{st1} = 1,6; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 1,8; p \leq 0,05$
Вариант 3.2	22,89 ± 0,69 $T_{st1} = 23,0; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 22,5; p \leq 0,05$	15,01 ± 0,45 $T_{st1} = 12,6; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 20,7; p \leq 0,05$	49,32 ± 1,48 $T_{st1} = 2,4; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 2,9; p \leq 0,05$
Вариант 3.3	13,59 ± 0,54 $T_{st1} = 4,2; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 2,1; p \leq 0,05$	14,45 ± 0,58 $T_{st1} = 9,4; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 15,7; p \leq 0,05$	46,52 ± 1,86 $T_{st1} = 0,3; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 0,4; p \leq 0,05$
Вариант 3.4	24,47 ± 0,73 $T_{st1} = 25,2; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 24,9; p \leq 0,05$	16,21 ± 0,49 $T_{st1} = 15,2; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 23,1; p \leq 0,05$	51,83 ± 1,55 $T_{st1} = 4,2; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 4,9; p \leq 0,05$

Продолжение таблицы 6

Опыт	Хлорофилл, %	Каротиноиды, %	Содержание азота, мг/г
Яровая мягкая пшеница сорта Памяти Афродиты			
Вариант 1.1	15,05 ± 0,60	10,57 ± 0,42	44,00 ± 1,76
Вариант 1.2	13,45 ± 0,40 $T_{st1} = 3,9; p \leq 0,05$	9,25 ± 0,28 $T_{st1} = 4,7; p \leq 0,05$	46,00 ± 1,38 $T_{st1} = 1,6; p \leq 0,05$
Вариант 2.1	23,36 ± 0,93 $T_{st1} = 13,2; p \leq 0,05$	14,30 ± 0,57 $T_{st1} = 9,3; p \leq 0,05$	46,58 ± 1,86 $T_{st1} = 1,8; p \leq 0,05$
Вариант 2.2	16,66 ± 0,50 $T_{st1} = 3,6; p \leq 0,05$	12,46 ± 0,37 $T_{st1} = 5,9; p \leq 0,05$	46,53 ± 1,40 $T_{st1} = 2,4; p \leq 0,05$
Вариант 2.3	16,41 ± 0,66 $T_{st1} = 2,7; p \leq 0,05$	12,17 ± 0,49 $T_{st1} = 4,3; p \leq 0,05$	47,69 ± 1,91 $T_{st1} = 2,5; p \leq 0,05$
Вариант 2.4	17,09 ± 0,51 $T_{st1} = 9,8; p \leq 0,05$	12,75 ± 0,38 $T_{st1} = 6,8; p \leq 0,05$	48,13 ± 1,44 $T_{st1} = 3,2; p \leq 0,05$
Вариант 3.1	18,78 ± 0,75 $T_{st1} = 4,5; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 10,9; p \leq 0,05$	11,05 ± 0,44 $T_{st1} = 1,4; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 6,0; p \leq 0,05$	49,41 ± 1,98 $T_{st1} = 3,6; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 2,5; p \leq 0,05$
Вариант 3.2	31,81 ± 0,95 $T_{st1} = 26,2; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 31,1; p \leq 0,05$	19,13 ± 0,57 $T_{st1} = 21,4; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 27,4; p \leq 0,05$	59,04 ± 1,77 $T_{st1} = 10,4; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 10,1; p \leq 0,05$
Вариант 3.3	23,11 ± 0,92 $T_{st1} = 12,8; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 16,9; p \leq 0,05$	10,97 ± 0,44 $T_{st1} = 1,1; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 5,7; p \leq 0,05$	49,52 ± 1,98 $T_{st1} = 3,6; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 2,5; p \leq 0,05$
Вариант 3.4	32,07 ± 0,85 $T_{st1} = 28,4; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 34,5; p \leq 0,05$	19,40 ± 0,58 $T_{st1} = 21,5; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 27,4; p \leq 0,05$	59,35 ± 1,78 $T_{st1} = 10,7; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 10,3; p \leq 0,05$
Яровая мягкая пшеница сорта Надежда Кузбасса			
Вариант 1.1	17,26 ± 0,69	11,45 ± 0,46	50,16 ± 2,01
Вариант 1.2	16,98 ± 0,51 $T_{st1} = 0,6; p \leq 0,05$	11,59 ± 0,35 $T_{st1} = 0,4; p \leq 0,05$	49,86 ± 1,50 $T_{st1} = 4,6; p \leq 0,05$
Вариант 2.1	21,65 ± 0,87 $T_{st1} = 6,9; p \leq 0,05$	14,17 ± 0,57 $T_{st1} = 6,5; p \leq 0,05$	50,33 ± 2,01 $T_{st1} = 0,1; p \leq 0,05$
Вариант 2.2	19,08 ± 0,57 $T_{st1} = 3,6; p \leq 0,05$	15,03 ± 0,45 $T_{st1} = 9,7; p \leq 0,05$	51,52 ± 1,55 $T_{st1} = 0,9; p \leq 0,05$
Вариант 2.3	18,93 ± 0,76 $T_{st1} = 2,8; p \leq 0,05$	14,89 ± 0,60 $T_{st1} = 8,8; p \leq 0,05$	51,31 ± 2,05 $T_{st1} = 0,7; p \leq 0,05$
Вариант 2.4	19,37 ± 0,58 $T_{st1} = 4,1; p \leq 0,05$	15,25 ± 0,46 $T_{st1} = 10,3; p \leq 0,05$	51,67 ± 1,55 $T_{st1} = 1,0; p \leq 0,05$
Вариант 3.1	23,25 ± 0,93 $T_{st1} = 9,1; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 10,0; p \leq 0,05$	13,26 ± 0,53 $T_{st1} = 4,5; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 4,6; p \leq 0,05$	52,89 ± 2,12 $T_{st1} = 1,6; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 2,0; p \leq 0,05$
Вариант 3.2	38,33 ± 1,15 $T_{st1} = 27,4; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 29,7; p \leq 0,05$	27,78 ± 0,83 $T_{st1} = 30,2; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 31,1; p \leq 0,05$	54,00 ± 1,62 $T_{st1} = 3,1; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 3,3; p \leq 0,05$
Вариант 3.3	16,91 ± 0,68 $T_{st1} = 0,6; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 0,1; p \leq 0,05$	13,97 ± 0,56 $T_{st1} = 6,1; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 6,3; p \leq 0,05$	50,21 ± 2,01 $T_{st1} = 0; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 0,2; p \leq 0,05$
Вариант 3.4	39,74 ± 1,19 $T_{st1} = 28,5; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 30,8; p \leq 0,05$	28,47 ± 0,85 $T_{st1} = 30,9; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 31,8; p \leq 0,05$	55,26 ± 1,66 $T_{st1} = 3,4; p \leq 0,05$ $T_{st2} = 4,2; p \leq 0,05$

Примечание: T_{st1} – сравнение с дистиллированной водой (вариант 1.1); T_{st2} – сравнение с внесением в почву 15 т/га цеолита (вариант 1.2).

Note: T_{st1} – vs. distilled water (Variant 1.1); T_{st2} – vs. 15 t/ha zeolite in soil (Variant 1.2).

вариант 3.2 (обработка штаммом *A. vinelandii* В-932 и внесение в почву цеолита) показывал наиболее высокое содержание хлорофилла (22,89 % от сухой массы) и каротиноидов (15,01 % от сухой массы). Данные результаты превышают показатели контрольной группы (вариант 1.1 (обработка дистиллированной водой) – 11,85 и 10,60 % от сухой массы соответственно,

вариант 1.2 (внесение в почву цеолита) – 12,78 и 8,81 % от сухой массы соответственно). Обработка растений вариантом 3.2 привела к увеличению количества азота в наземной части растения (49 мг/г). Вариант 3.1 так же показал положительный результат, в котором содержание хлорофилла и каротиноидов равны 19,27 и 12,77 % соответственно, содержание азота – 48,3 мг/г.

Обработка вариантом 3.2 пшеницы сорта Памяти Афродиты продемонстрировал высокий результат по содержанию хлорофилла (31,81 % от сухой массы) и каротиноидов (19,13 % от сухой массы) по сравнению с контрольными образцами: вариант 1.1 – 15,05 и 10,57 % от сухой массы соответственно, вариант 1.2 – 13,45 и 9,25 % от сухой массы соответственно. В сухой массе растений обнаружено наибольшее количество азота – 59,04 мг/г.

В варианте 3.4 (консорциум и цеолит) обнаружено содержание хлорофилла и каротиноидов в количестве 25,34 и 18,80 % соответственно, азота – 53,97 мг/г, что может говорить о том, что совместное действие цеолита и консорциума положительно влияет на рост пшеницы сорта Памяти Афродиты.

Исследование показало, что обработка пшеницы сорта Надежда Кузбасса консорциумом с внесением в почву 1 т/га цеолита (вариант 3.4) привела к наибольшему повышению уровня хлорофилла и каротиноидов в растениях. Содержание хлорофилла и каротиноидов составило 39,74 и 28,47 % от сухой массы соответственно, азота – 55,36 мг/г, что значительно выше в сравнении с контрольными образцами.

Также положительные результаты можно наблюдать в обработке вариантом 3.2, где содержание хлорофилла и каротиноидов равно 38,33 и 27,78 % соответственно, азота – 54,00 мг/г.

Полученные данные говорят о том, что совместное использование консорциума или микроорганизма (преимущественно штамма *A. vinelandii* B-932) и цеолита оказывает высокое положительное стимулирующее действие на содержание фотосинтезирующих пигментов и азота в наземной части яровой мягкой пшеницы сортов Сибирский Альянс, Памяти Афродиты и Надежда Кузбасса.

Выводы

Результаты исследования подтверждают, что совместное использование цеолита и микроорганизмов приводит к повышению урожайности злаковых культур, улучшению их качественного состава и увеличению роста растений. Данные, полученные в ходе эксперимента, показали, что выбранные штаммы – *Azotobacter chroococcum* B-4148; *Azotobacter vinelandii* B-932; *Pseudomonas chlororaphis* subsp. *aurantiaca* B-548 – проявляли способность к солюбилизации

ции цеолита в диапазоне 2,5–17,7 мм. Наибольшей солюбилизующей способностью обладал *P. Chlororaphis* subsp. *aurantiaca* B-548 (17,7 ± 3,8 мм).

Лабораторная апробация показала, что цеолит и микроорганизмы как отдельно, так и совместно положительно влияют на рост и развитие яровой мягкой пшеницы сортов Сибирский Альянс, Памяти Афродиты, Надежда Кузбасса. Наилучший эффект наблюдали у варианта 3.4 (обработка консорциумом с внесением в почву 1 т/га цеолита) для сорта Сибирский Альянс. Так, всхожесть составила 86 %, длина побега – 183 мм, сухая масса – 42,4 %, содержание хлорофилла – 24,47 %, содержание каротиноидов – 16,21 %, азота – 51,83 %. Для сорта Памяти Афродиты – вариант 3.4, где всхожесть составила 80 %, длина побега – 157 мм, сухая масса – 31,3 %, содержание хлорофилла – 32,07 %, содержание каротиноидов – 19,40 %, азота – 59,35 %. Для сорта Надежда Кузбасса – вариант 3.4. всхожесть – 98 %, длина побега – 185 мм, сухая масса – 41,2 %, содержание хлорофилла – 39,74 %, содержание каротиноидов – 28,47 %, азота – 55,26 %.

Таким образом, проанализировав результаты лабораторной апробации, можно сделать вывод, что применение цеолита и консорциума (состав: *A. chroococcum* B-4148, *A. vinelandii* B-932 и *P. chlororaphis* subsp. *aurantiaca* B-548 в соотношении 1:3:1) положительно влияет на рост и развитие яровой мягкой пшеницы. В дальнейшем планируется проведение полевого эксперимента.

Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в подготовке и написании статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии потенциальных конфликтов интересов в отношении исследования, авторства и / или публикации данной статьи.

Contribution

All the authors contributed equally to the study and bear equal responsibility for the information published in this article.

Conflict of interest

The authors declared no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы / References

1. Gavasso-Rita YL, Papalexiou SM, Li Y, Elshorbagy A, Li Z, et al. Crop models and their use in assessing crop production and food security: A review. Food and Energy Security. 2024;13(1):e503. <https://doi.org/10.1002/fes3.503>
2. Godfray HCJ, Beddington JR, Crute IR, Haddad L, Lawrence D, et al. Food security: The challenge of feeding 9 billion people. Science. 2010;327(5967):812–818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>
3. Lan Y, Chawade A, Kuktaite R, Johansson E. Climate change impact on wheat performance—Effects on vigour, plant traits and yield from early and late drought stress in diverse lines. International Journal of Molecular Sciences. 2022;23(6):3333. <https://doi.org/10.3390/ijms23063333>

4. Al-Hawamdeh F, Ayad JY, Alananbeh KM, Akash MW. Bacterial endophytes and their contributions to alleviating drought and salinity stresses in wheat: A systematic review of physiological mechanisms. *Agriculture*. 2024;14(5):769. <https://doi.org/10.3390/agriculture14050769>
5. Mozumder P, Berrens RP. Inorganic fertilizer use and biodiversity risk: An empirical investigation. *Ecological Economics*. 2007;62(3–4):538–543. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.07.016>
6. Mitra B, Chowdhury AR, Dey P, Hazra KK, Sinha AK, *et al.* Use of agrochemicals in agriculture: Alarming issues and solutions. In: Bhatt R, Meena RS, Hossain A, editors. *Input Use Efficiency for Food and Environmental Security*, Singapore: Springer Nature Singapore. 2021. pp. 85–122. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5199-1_4
7. Колпакова Д. Е., Серазетдинова Ю. Р., Фотина Н. В., Заушинцева А. В., Асякина Л. К. и др. Микробная биофортификация злаковых культур: перспективы и текущее развитие. *Техника и технология пищевых производств*. 2024. Т. 54. № 2. С. 191–211. [Kolpakova DE, Serazetdinova YuR, Fotina NV, Zaushintsena AV, Asyakina LK, *et al.* Microbial biofortification of grain crops: Current state and prospects. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2024;54(2):191–211. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-94142024-2-2500>
8. Senabio JA, Silva RC, Pinheiro DG, Vasconcelos LG, Soares MA. The pesticides carbofuran and picloram alter the diversity and abundance of soil microbial communities. *PLOS One*. 2024;19(11):e0314492. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0314492>
9. Alengebawy A, Abdelkhalek ST, Qureshi SR, Wang MQ. Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: Ecological risks and human health implications. *Toxics*. 2021;9(3):42. <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>
10. Madlala NC, Khanyile N, Masenya A. Examining the correlation between the inorganic nano-fertilizer physical properties and their impact on crop performance and nutrient uptake efficiency. *Nanomaterials*. 2024;14(15):1263. <https://doi.org/10.3390/nano14151263>
11. Ayenew BM, Satheesh N, Zegeye ZB, Kassie DA. A review on the production of nano-fertilizers and its application in agriculture. *Heliyon*. 2025;11(1):e41243. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41243>
12. Kardala N, Wyszowski M. Zeolite properties, methods of synthesis, and selected applications. *Molecules*. 2024;29(5):1069. <https://doi.org/10.3390/molecules29051069>
13. Verma KK, Song X-P, Li D-M, Singh M, Wu J-M, *et al.* Silicon and soil microorganisms improve rhizospheric soil health with bacterial community, plant growth, performance and yield. *Plant Signaling & Behavior*. 2022;17(1):2104004. <https://doi.org/10.1080/15592324.2022.2104004>
14. Asyakina LK, Vorob'eva EE, Proskuryakova LA, Zharko MYu. Evaluating extremophilic microorganisms in industrial regions. *Foods and Raw Materials*. 2023;11(1):162–171. <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-556>
15. Василина Т. К., Балгабаев А. М., Шибикеева А. М., Абилдаев Е. С., Закиева А. А. Влияние цеолита и модифицированного цеолитного удобрения на агрофизические свойства темно-каштановой почвы в предгорной зоне юго-востока Казахстана. *Почвоведение и агрохимия*. 2024. № 3. С. 62–71. [Vassilina TK, Balgabaev AM, Shibikkeyeva AM, Abyldayev ES, Zakiyeva A. Effectiveness of use of zeolite in vegetable growing in the footdown zone of southeast Kazakhstan. *Soil Science and Agrochemistry*. 2024;(3):62–71. (In Russ.)] https://doi.org/10.51886/1999-740X_2024_3_62
16. Zheng J, Chen T, Chi D, Xia G, Wu Q, *et al.* Influence of zeolite and phosphorus applications on water use, P uptake and yield in rice under different irrigation managements. *Agronomy* 2019;9(9):537. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090537>
17. Куликова А. Х., Карпов А. В., Черкасов М. С. Влияние цеолита и удобрений на его основе на урожайность кукурузы и баланс элементов питания в черноземе выщелоченном под ее посевами. *Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии*. 2023. № 2. С. 69–75. [Kulikova AKh, Karpov AV, Cherkasov MS. Influence of zeolite and zeolite-based fertilizers on corn yield and balance of nutrients in leached black soil under corn crops. *Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy*. 2023;(2):69–75. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/RYNKJS>
18. Chamani HE, Amoli HF, Niknejad Y, Tari DB. Effects of zeolite and biofertilizers on yield components, yield and nutrients uptake in grains of two corn cultivars (cv. 6010 and ns71). *Journal of Plant Nutrition*. 2022;45(11):1670–1681. <https://doi.org/10.1080/01904167.2021.2014876>
19. Degtyareva I, Kirillova N. Comparative evaluation of the effect of various biofertilizers in complex with zeolite on productivity and microbiocenosis of buckwheat. *Vestnik of Kazan state agrarian university*. 2024;19(4):34–40. <http://dx.doi.org/10.12737/2073-0462-2024-34-40>
20. Mondal M, Biswas B, Garai S, Sarkar S, Banerjee H, *et al.* Zeolite enhance soil health, crop productivity and environmental safety. *Agronomy*. 2021;11(3):448. <https://doi.org/10.3390/agronomy11030448>
21. Исмагулова Г. Е., Суюндукова М. Б., Суюндуков Я. Т., Мухамутдинова Г. А. Влияние природных цеолитов на плодородие почв и продуктивность сельскохозяйственных наук. *Аграрная наука*. 2008. № 7. С. 21–23. [Islamgulova GE, Suyndukova MB, Suyndukov YaT, Mukhametdinova GA. Influence of native ceolyte on soil fertility. *Agrarian Science*. 2008;(7):21–23. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/KXUWHR>
22. Дегтярева И. А., Прищепенко Е. А., Рахманова Г. Ф., Миникаев Д. Т. Оценка действия удобрений нового поколения на микробный ценоз ярового рапса. *Агрохимический вестник*. 2022. № 5. С. 65–69. [Degtyareva IA, Prishchepenko EA, Rakhmanova GF, Minikaev DT. Evaluation of action of new generation fertilizers on microbial coenosis of spring rape. *Agrochemical Herald*. 2022;(5):65–69. (In Russ.)] <https://doi.org/10.24412/1029-2551-2022-5-013>

23. Kordala N, Wyszowski M. Zeolite properties, methods of synthesis, and selected applications. *Molecules*. 2024;29(5):1069. <https://doi.org/10.3390/molecules29051069>
24. Kulikova A, Yashin E, Karpov A, Romashkin A. The effectiveness of zeolite enriched with amino acids in the cultivation of crops in the Middle Volga region (on the example of millet). *BIO Web of Conferences*. 2021;37(7):00096. <http://dx.doi.org/10.1051/bioconf/20213700096>
25. Serazetdinova Yu, Chekushkina D, Borodina E, Kolpakova D, Minina V, et al. Synergistic interaction between *Azotobacter* and *Pseudomonas* bacteria in a growth-stimulating consortium. *Foods and Raw Materials*. 2025;13(2):376–393. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2025-2-651>
26. Bist V, Niranjana A, Ranjan M, Lehri A, Seem K, et al. Silicon-solubilizing media and its implication for characterization of bacteria to mitigate biotic stress. *Frontiers in Plant Science*. 2020;11:28. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00028>
27. Faskhutdinova ER, Fotina NV, Neverova OA, Golubtsova YV, Mudgal G, et al. Extremophilic bacteria as biofertilizer for agricultural wheat. *Foods and Raw Materials*. 2024;12:348–60. <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2024-2-613>
28. Серазетдинова Ю. Р., Фотина Н. В., Асякина Л. К., Просеков А. Ю., Неверова О. А. Роль *Bacillus amyloliquefaciens* в снижении абиотического стресса зерновых культур. XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2023. Т. 12. № 4. С. 178–183. [Serazetdinova YuR, Fotina NV, Asyakina LK, Prosekov AYU, Neverova OA. The role of *Bacillus amyloliquefaciens* in reducing the abiotic stress of cereals. XXI Century: Resumes of the past and challenges of the present plus. 2023;12(4):178–183. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/LBKHMF>
29. Albassam M, Aslam M. Testing internal quality control of clinical laboratory data using paired *t*-test under uncertainty. *BioMed Research International*. 2021;5527845. <https://doi.org/10.1155/2021/5527845>
30. Hindersah R, Rahmadina I, Harryanto R, Suryatmana P, Arifin M. *Bacillus* and *Azotobacter* counts in solid bio-fertilizer with different concentration of zeolite and liquid inoculant. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;667:012010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/667/1/012010>
31. Salamatpour S, Niknezhad Y, Fallah H, Tari DB. Impacts of chemical and organic fertilizers along with silicon on agronomic traits, yield and nutrient content in rice under plant growth-promoting bacteria. *Cereal Research Communications*. 2024;53:1133–1145. <https://doi.org/10.1007/s42976-024-00591-7>