

Оценка влияния альгоцианобактериальных комплексов на параметры почвенного плодородия и продуктивность агрофитоценоза озимого ячменя

Ю.М. БАЧУРА, А.А. НОВИКОВА

В статье представлены данные о влиянии альгоцианобактериальных комплексов на ряд агрохимических параметров почвы и морфологические показатели ячменя. Внесение фототрофов привело к увеличению содержания в ризосфере подвижного калия на 358 млн⁻¹ и органического вещества на 0,41 %. При изучении продуктивности агрофитоценоза ячменя наибольшее количество растений отмечено в вариантах с монокультурами микроорганизмов. Максимальные показатели длины колоса (171,4 мм) и количества зерен (31,5 шт) получены при внесении комплексов *Nostoc-Vischeria* в соотношении 2:1, массы зерна (1,25 г) – в соотношении 1:2.

Ключевые слова: цианобактерии, микроводоросли, фитостимулирующее действие, озимый ячмень, почва.

The article presents data on the effect of algocyanobacterial complexes on a number of agrochemical parameters of soil and morphological traits of barley. The introduction of phototrophs led to an increase in the content of exchangeable potassium by 358 ppm and organic matter by 0,41 % in the rhizosphere. When studying the productivity of the barley agrophytocenosis, the highest plant number was observed in the variants with monocultures of microorganisms. Maximum spike length (171,4 mm) and grain number per spike (31,5) were obtained with the application of *Nostoc-Vischeria* complexes in a 2:1 ratio, while grain weight per spike (1,25 g) was highest with a 1:2 ratio.

Keywords: cyanobacteria, microalgae, plant growth-promoting effect, winter barley, soil.

Введение. Агрофитоценозы – основа сельскохозяйственного производства, их продуктивность и устойчивость напрямую зависят от уровня почвенного плодородия и применяемых агротехнологий. В современных условиях интенсивного земледелия, характеризующегося широким применением минеральных удобрений и сопутствующими экономическими и экологическими издержками, особую значимость приобрели вопросы перехода к устойчивым агроприемам, рационализации использования почвы и повышения её качества [1]–[2]. Для решения данных вопросов активно внедряются биопрепараты, созданные на основе различных групп микроорганизмов, в том числе фототрофов, которые представлены микроводорослями и цианобактериями.

Широкий спектр экологических функций микроводорослей и цианобактерий обуславливает их высокий биотехнологический потенциал и актуальность дальнейшего изучения [3]–[7]. Имеются данные о влиянии данных групп фототрофных микроорганизмов как на показатели почвы, так и на рост и развитие высших растений [8]–[16]. Известно, что водоросли и цианобактерии могут улучшать агрегатный состав почвы за счёт выделения слизистых веществ, склеивающих почвенные частицы, обогащать пахотный слой органическим веществом и биодоступным азотом, а также мобилизовать труднорастворимые фосфаты [17], [18]. В отношении высших растений эти фототрофные микроорганизмы выступают продуцентами фитогормонов (ауксинов, цитокининов), витаминов и аминокислот, что стимулирует прорастание семян, ускоряет развитие корневой системы, надземных вегетативных и генеративных органов и способствует накоплению биомассы [19], [20].

Целью настоящего исследования являлось изучение влияния суспензий цианобактерий рода *Nostoc*, микроводорослей рода *Vischeria* и их комплексов на динамику изменения агрохимических показателей почвы и продуктивность агрофитоценоза озимого ячменя.

Материал и методика исследований. Полевые исследования были проведены в 2025 г. в окрестностях агрогородка Лопатино Гомельского района Гомельской области на базе сельскохозяйственного предприятия ОАО «Агрокомбинат «Южный». Опытный участок располагался в агрофитоценозе озимого ячменя (*Hordeum vulgare* L.), который находится в севообороте с соблюдением агротехнических норм. Агрофитоценоз характеризуется дерново-подзолистыми легкосуглинистыми почвами, отсутствием значительных антропогенных нарушений (эрозия, переуплотнение) и однородностью почвенного покрова, что позволило минимизировать погрешности эксперимента.

В качестве тест-культур для изучения ростостимулирующей активности использовали суспензии азотфиксирующей почвенной цианобактерии рода *Nostoc* и микроводоросли *Vischeria magna*, являющихся типичными представителями альгоцианобактериальной флоры Республики Беларусь.

Микроводоросли и цианобактерии выращивали на основной среде Болда (Bold basal medium – BBM) при температуре $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$ при 10/14-часовом чередовании световой и темновой фаз и освещении 3500–4000 лк с барботированием в световой период. Учёт численности клеток почвенных микроводорослей и цианобактерий проводили с использованием камеры Горяева по стандартной методике [21]. Плотность суспензий цианей в серии экспериментов составила 25,7 млн клеток на 1 мл культуры, плотность суспензий вишерии – 29,75 млн клеток на 1 мл культуры. Маточную суспензию использовали для приготовления рабочей суспензии: разбавляли дистиллированной водой 1:9 для получения рабочего десятипроцентного раствора.

В фазу кущения озимого ячменя методом прикорневого полива проводили внесение микроорганизмов в 3-кратной повторности в количестве 500 мл рабочей суспензии на один ряд длиной 2 м в соответствии с вариантами опыта: 1) опыт I (разбавленная культура микроорганизма *Nostoc*); 2) опыт II (1 часть разбавленной культуры *Nostoc* : 2 части разбавленной культуры *Vischeria*, 1N:2V); 3) опыт III (1 часть разбавленной культуры *Nostoc* : 1 часть разбавленной культуры *Vischeria*, 1N:1V); 4) опыт IV (2 части разбавленной культуры *Nostoc* : 1 часть разбавленной культуры *Vischeria*, 2N:1V); 5) опыт V (разбавленная культура микроорганизма *Vischeria*); 6) контроль I (BBM); 7) контроль II (дистиллированная вода).

Для оценки действия инокулянтов проводили учёт элементов структуры урожая озимого ячменя в фазе восковой спелости. В соответствии с вариантами опыта отбирали растения, учитывая их количество, для измерения длины стебля, длины главного колоса с осями и без, учета продуктивности (количество зёрен, масса зёрен).

Изучение основных агрохимических показателей выполняли до внесения альгоцианобактериальных комплексов и после уборки урожая, отбирая по 30 репрезентативных проб в следующих зонах: ризосфера ячменя, корневая зона, междурядье, а также на контрольном участке вне поля. Отбор проб осуществляли послойно по горизонтам 0–5 см, 5–10 см и 10–15 см.

Почвенные образцы доводили до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре, просеивали через сито диаметром ячеек 1 мм, гомогенизировали и квартовали. Анализ образцов почвы на содержание рН, фосфора, калия, органического вещества, кальция, магния проводили на базе КУП «Гомельская ОПИСХ».

Статистическую обработку полученных данных осуществляли с помощью Microsoft Excel.

Результаты исследований и их обсуждение. Базовые показатели плодородия почвы, зафиксированные в мае до внесения микроорганизмов, служат контрольным фоном для последующей оценки их эффективности. Данные позволяют оценить не только общий уровень обеспеченности элементами питания, но и пространственную неоднородность внутри поля (агроценоз ячменя) в сравнении с контрольным участком вне поля.

Анализ основных агрохимических показателей опытных делянок до внесения микроводорослей и цианобактерий представлен в таблице 1. Почва на делянке с ячменем была близка к нейтральной (средний показатель рН составлял 6,15), реакция почвенного раствора с глубиной изменялась незначительно как на делянке, так и вне поля. Растения проявляют различную чувствительность к кислой и щелочной среде. Снижение ростовых процессов наблюдается при рН ниже 5 и выше 8. Для произрастания большинства сельскохозяйственных культур рН солевой вытяжки почвы должен быть в диапазоне 5,5–7,0.

Таблица 1 – Основные агрохимические показатели опытных делянок (май)

Расположение	рН, ед. рН	p_{2O_5} , млн ⁻¹	K_2O , млн ⁻¹	Орган. в-во, %	CaO, млн ⁻¹	MgO, млн ⁻¹	
Корневая зона	0–5	6,15	433	237	1,96	1325	291,85
	5–10	6,205	421	254	1,99	1265	290,9
	10–15	6,15	368	256	2,04	1247	278,75
Междурядье	0–5	6,08	349	253	1,85	1194	271,7
	5–10	6,145	473	308	1,95	1227,5	277,75
	10–15	6,17	446	316	1,99	1220	277,75

Окончание таблицы 1

Вне поля	0–5	6,365	561	610	4,81	2585,5	462,55
	5–10	6,39	608	532	3,99	2651	415,15
	10–15	6,245	578	530	4,19	2623,5	419,15
Ризосфера		6,16	402	410	2,1	1111	220,2

Важную роль в создании почвенного плодородия играет содержание гумуса, исследуемая почва характеризовалась низким содержанием гумуса (1,85–2,04) %, при переходе к нижележащим горизонтам показатель изменялся мало на всех участках.

Эффективное плодородие почв в отношении фосфатов определяется запасом подвижных форм фосфора. К этой группе относятся различные формы почвенных фосфатов, находящиеся в динамическом равновесии «твёрдая фаза почвы – раствор». Среднее содержание элементов питания в почве соответствует условиям, при которых можно получить средне-статистический урожай зерновых культур в данном регионе. Высокое содержание элемента соответствует условиям, при которых возможно возделывание высокотребовательных культур. Обеспеченность исследуемой почвы фосфором и калием была высокой. Содержание подвижного фосфора в корневой зоне при переходе к нижележащим горизонтам снижалось, между рядами и вне поля повышалось; содержание подвижного калия на участках поля по профилю почвы увеличивалось, вне поля – снижалось.

Кальций и магний являются важными элементами питания растений. Обеспеченность почвы делянок магнием повышенная (в пределах от 271,7 мг/кг до 291,85 мг/кг), кальцием – варьировала от повышенной (более 1201 мг/кг) на опытных участках до высокой на контрольном участке вне поля. По профилю почв содержание кальция и магния варьировало незначительно.

В целом на контрольном участке вне поля отмечено более высокое по сравнению с агроценозом ячменя содержание подвижных форм фосфора и калия, органического вещества, кальция и магния. В ризосфере установлено повышенное содержание подвижного калия и снижение количества кальция и магния по сравнению с почвой опытного участка.

Анализ основных агрохимических показателей опытных делянок после внесения микроводорослей и цианобактерий представлен в таблице 2. После внесения суспензий микроводорослей и цианобактерий почва на делянке с ячменем осталась близкой к нейтральной (средний показатель рН составлял 6,1), реакция почвенного раствора с глубиной изменялась незначительно как на опытных участках, так и на контрольном участке вне поля.

Содержание гумуса в исследуемой почве после внесения фототрофных микроорганизмов варьировало в пределах (1,85–2,04) %, при переходе к нижележащим горизонтам показатель на опытных площадках изменялся мало, вне поля отмечено снижение содержания органического вещества в нижних горизонтах.

Таблица 2 – Основные агрохимические показатели опытных делянок (август)

Расположение	рН, ед. рН	p ₂ O ₅ , млн ⁻¹	K ₂ O, млн ⁻¹	Орган. в-во, %	CaO, млн ⁻¹	MgO, млн ⁻¹	
Корневая зона	0–5	5,56	391,5	406	2,4	1309	217,15
	5–10	5,59	433	337	2,32	1271	214,15
	10–15	5,58	420	330	2,23	1341,5	280,3
Междурядье	0–5	5,945	472	307	2,40	1242	243,4
	5–10	5,97	460	277	2,31	1361	261,6
	10–15	5,985	463	280	2,29	1346,5	260,55
Вне поля	0–5	6,055	423	272	3,1	2010	309,05
	5–10	6,06	440	290	2,73	1872	314,1
	10–15	6,025	390	248	2,44	1915,5	300,95
Ризосфера		6,61	464	768	2,51	1221	262,6

Обеспеченность исследуемой почвы фосфором и калием была высокой. Содержание подвижного калия в корневой зоне при переходе к нижележащим горизонтам снижалось, на остальных участках содержание калия и фосфора по профилю почвы изменялось незначительно. Обеспеченность почвы опытной делянки магнием и кальцием была повышенной, контрольного участка вне поля – высокой. По профилю почв содержание кальция и магния варьировало незначительно.

На контрольном участке вне поля по сравнению с опытным участком отмечено более высокое содержание органического вещества, кальция и магния. В ризосфере установлено повышенное содержание подвижного калия и органического вещества по сравнению с почвой исследуемого опытного участка.

Сравнительный анализ агрохимических показателей опытных и контрольных участков до и после внесения суспензий микроводорослей и цианобактерий показал в корневой зоне снижение рН на 0,6 единиц по окончании опыта, увеличение подвижного калия на 109 млн^{-1} ; незначительное увеличение органического вещества, а также снижение содержания магния в верхних горизонтах почвы. В междурядьях установлено небольшое увеличение рН почвенного раствора (0,2 единицы), содержания органического вещества (0,4 %) и кальция, а также подвижного фосфора в слое (0-5) см (123 млн^{-1}). В ризосфере показано увеличение показателя рН на 0,45 единиц, подвижного калия на 358 млн^{-1} , кальция на 110 млн^{-1} , органического вещества на 0,41 %.

На контрольном участке вне поля после окончания эксперимента выявлено снижение анализируемых агрохимических показателей: рН на 0,3 единицы, подвижного фосфора на 165 млн^{-1} , подвижного калия на 287 млн^{-1} , органического вещества на 1,57 %, кальция на $687,5 \text{ млн}^{-1}$, магния на $124,3 \text{ млн}^{-1}$.

Анализ общего количества экземпляров ячменя на участках с различными вариантами внесения суспензий микроводорослей, цианобактерий и контрольных жидкостей показал выраженное положительное влияние применения суспензий микроводорослей рода *Nostoc* и микроводорослей рода *Vischeria*, а также их комплексов на сохранность посевов. Максимальные значения были зафиксированы в вариантах с культурами микроводоросли *Vischeria* (113 растений) и цианобактерии *Nostoc* (103 растения), что существенно превышало показатели контрольных групп (60 растений с дистиллированной водой и 53 растения с основной средой Болда) (рисунок 1).

В вариантах с совместным применением суспензий фототрофных микроорганизмов также отмечены высокие значения сохранности растений, особенно в варианте опыта с комплексом *Nostoc-Vischeria* состава 1N:2V (98 растений).

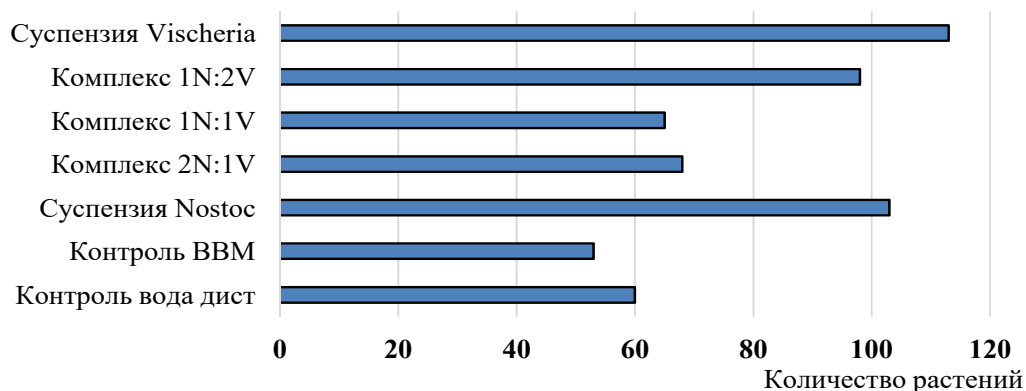


Рисунок 1 – Сравнение количества растений в поле в эксперименте

Полученные данные позволяют предположить, что использование суспензий изучаемых микроводорослей, цианобактерий и их комплексов способствует повышению жизнеспособности ячменя, возможно, за счет усиления устойчивости к абиотическим стрессам и улучшения минерального питания.

При сравнении длины стеблей ячменя было выявлено, что моноинокуляция суспензиями штаммов ностока ($(403,16 \pm 12,29) \text{ мм}$) и вишерии ($(459,64 \pm 10,31) \text{ мм}$) не оказала статистически значимого стимулирующего эффекта по сравнению с контролем дистиллированной водой ($(418,12 \pm 15,05) \text{ мм}$). Положительная динамика наблюдалась при совместном применении фототрофных микроорганизмов (рисунок 2). В вариантах опыта с альгоцианобактериальными комплексами состава 2N:1V ($(502,93 \pm 10,70) \text{ мм}$) и 1N:2V ($(501,07 \pm 9,16) \text{ мм}$) ус-

тановлен положительный фитозффект по отношению к контролю дистиллированной водой, по отношению к контролю с питательной средой стимулирующее влияние комплексов на длину стеблей не выявлено ($(520,77 \pm 12,62)$ мм).

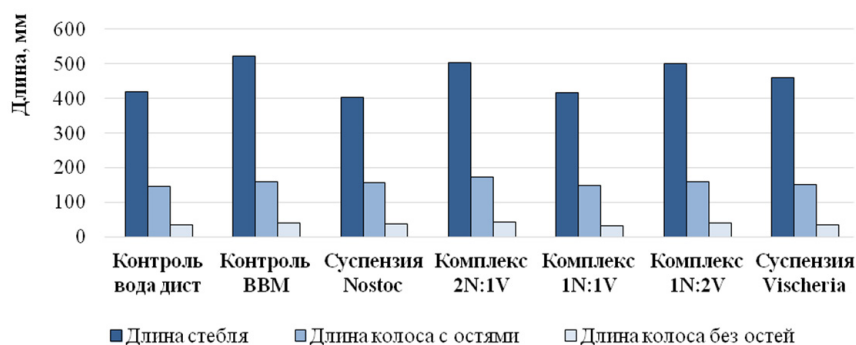


Рисунок 2 – Сравнение морфометрических показателей ячменя

Анализ влияния суспензий микроводорослей, цианобактерий и их комплексов на длину колоса с остями показал преимущество использования комплексов *Nostoc* и *Vischeria* в соотношении 2:1 ($(171,43 \pm 5,74)$ мм) как относительно обоих контрольных вариантов, так и относительно вариантов опыта с чистыми суспензиями микроводоросли и цианобактерии.

При анализе фитозффектов по длине колоса ячменя без остей максимальные результаты установлены в варианте опыта с комплексом *Nostoc-Vischeria* состава 2N:1V ($(42,40 \pm 1,13)$ мм), численные показатели значительно превышали результаты в контрольных вариантах. Наименьшие значения отмечены в варианте опыта с альгоцианобактериальным комплексом состава 1N:1V ($(32,58 \pm 1,43)$ мм) и при внесении суспензий микроводоросли *Vischeria* ($(32,90 \pm 0,95)$ мм), что свидетельствует о важности оптимального соотношения компонентов в микробных консорциумах для реализации их потенциала.

Исследование количественных характеристик продуктивности колоса ячменя выявило значимые различия между вариантами опыта по числу зерен (рисунок 3). Сравнения средних величин позволили дифференцировать все изучаемые варианты на две гомогенные подгруппы. В первую группу с максимальными значениями вошли положительный контроль BVM ($(31,96 \pm 1,48)$ шт.), вариант опыта с комплексом *Nostoc-Vischeria* в соотношении 2:1 ($(31,49 \pm 1,17)$ шт.) и вариант опыта с комплексом состава 1N:2V ($(29,18 \pm 0,80)$ шт.). Вторую группу с минимальными значениями составили контроль дистиллированной водой ($(25,57 \pm 1,20)$ шт.), варианты опыта с суспензиями цианобактерии рода *Nostoc* и микроводоросли рода *Vischeria* ($(23,71 \pm 0,95)$ и $(24,37 \pm 1,00)$ шт. соответственно) и альгоцианобактериальным комплексом состава 1N:1V ($(23,65 \pm 1,420)$ шт.).

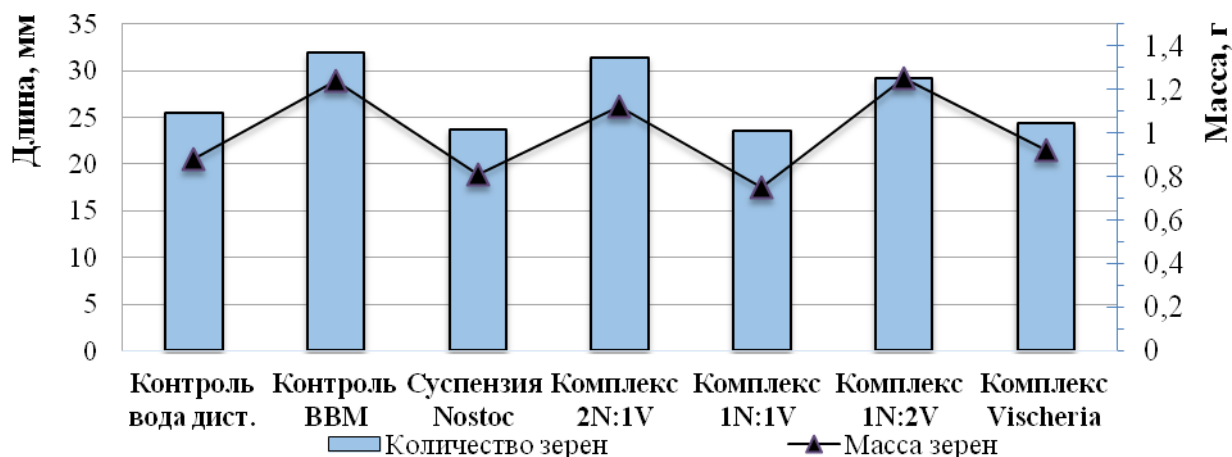


Рисунок 3 – Сравнение продуктивности колоса ячменя

Максимальные показатели массы зерна были зафиксированы в варианте опыта с использованием комплекса *Nostoc-Vischeria* в соотношении 1:2, составившие $(1,25 \pm 0,11)$ г. Данный показатель был несколько ниже в контроле с основной средой Болда ($(1,24 \pm 0,13)$ г), однако превосходил значения в остальных вариантах опыта и в контроле с дистиллированной водой. Высокую эффективность также демонстрировал альгоцианобактериальный комплекс состава 2N:1V ($(1,12 \pm 0,06)$ г).

Наименьшие значения продуктивности отмечены в варианте опыта с комплексом *Nostoc-Vischeria* 1N:1V ($(0,75 \pm 0,07)$ г) и при обработке посевов суспензией цианобактерии рода *Nostoc* ($(0,81 \pm 0,05)$ г).

Проведенное исследование показало перспективность применения суспензий цианобактерий рода *Nostoc*, микроводорослей рода *Vischeria* и их комплексов в агрофитоценозах на примере озимого ячменя. В ризосфере ячменя отмечено увеличение содержания подвижного калия на 358 млн^{-1} и органического вещества на 0,41 %, а также повышение рН и содержания кальция. В корневой зоне и междурядьях также зафиксировано незначительное увеличение элементов питания. На контрольном участке вне поля за тот же период произошло снижение анализируемых показателей, что свидетельствует о положительной роли инокуляции фототрофных микроорганизмов в поддержании почвенного плодородия. Применение суспензий цианобактерий и микроводорослей способствовало лучшей выживаемости растений в агрофитоценозе. Выявлен выраженный стимулирующий эффект при совместном применении суспензий *Nostoc* и *Vischeria* в соотношениях 2:1 и 1:2, проявляющийся в улучшении морфометрических параметров колоса и увеличения массы зерна.

Литература

1. Кирюшин, В. И. Экологические основы земледелия / В. И. Кирюшин. – М. : Колос, 1996. – 367 с.
2. Лапшин, Ю. А. Методические аспекты создания гетерогенных агрофитоценозов и их роль в повышении продуктивности агроландшафта / Ю. А. Лапшин // Вестник Марийского гос. ун-та. Серия, Сельскохозяйственные науки. Экономические науки. – 2018. – Т. 4, № 2. – С. 36–42.
3. Дидович, С. В. Биотехнологический потенциал почвенных цианобактерий (обзор) / С. В. Дидович [и др.] // Вопросы современной альгологии. – 2017. – № 2 (14). – URL: <http://algology.ru/1170> (дата обращения: 01.10.2025).
4. Михеева, Т. М. Перспективы использования культивируемых и планктонных микроскопических водорослей / Т. М. Михеева // Наука и инновации. – 2018. – № 2 (180). – С. 15–19.
5. Югай, М. О. Цианобактерии как объект биотехнологии / М. О. Югай, Н. И. Кордакова // Вестник КазНИТУ. – 2016. – № 4. – С. 304–307.
6. Успенская, В.И. Экология и физиология питания пресноводных водорослей / В. И. Успенская. – М. : МГУ, 1966. – 124 с.
7. Седова, Т. В. Кариология водорослей / Т. В. Седова. – СПб., 1996. – 386 с.
8. Терещенко, Н. Н. Биоудобрения на основе микроорганизмов / Н. Н. Терещенко. – Томск : ТГУ, 2003. – 60 с.
9. Трефилова, Л. В. Использование цианобактерий в агробиотехнологии : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.07 ; 03.00.23 / Трефилова Людмила Васильевна ; Ин-т биохимии и физиологии растений и микроорганизмов РАН. – Саратов, 2008. – 26 с.
10. Шальго, Н. В. Микроводоросли и цианобактерии как биоудобрение / Н. В. Шальго // Наука и инновации. – 2019. – № 3 (193). – С. 22–26.
11. Chamizo, S. Cyanobacteria inoculation improves soil stability and fertility on different textured soils : gaining insights for applicability in soil restoration / S. Chamizo [et al.] // Original Research. – 2018. – Vol. 6. – P. 101–114.
12. Role of algae and cyanobacteria insustainable agriculture system / R. Sharma [et al.] // Wudpecker J. Agric. Res. – 2012. – Vol. 1, № 9. – P. 381–388.
13. Доброжан, С. Н. Использование некоторых видов синезеленых азотфиксирующих водорослей в качестве биологического удобрения / С. Н. Доброжан [и др.] // Альгология. – 2014. – Т. 24, № 3. – С. 426–429.
14. Prasanna, R. Cyanobacteria as a «green» option for sustainable agriculture / R. Prasanna [et al.] // Cyanobacteria : An Economic Perspective / Eds.: N. K. Sharma, A. K. Rai, L. J. Stal. – Chichester, West Sussex : Wiley and Sons, 2014. – Ch. 9. – P. 145–166.

15. Paudel, Y. P. Role of blue green algae in rice productivity / Y. P. Paudel [et al.] // *Agriculture and Biology Journal of North America*. – 2012. – Vol. 3, № 8. – P. 332–335.
16. Лукьянов, В. А. Прикладные аспекты применения микроводорослей в агроценозе / В. А. Лукьянов, А. И. Стифеев. – Курск : КГСХА, 2014. – 181 с.
17. Штина, Э. А. Экология почвенных водорослей / Э. А. Штина, М. М. Голлербах. – М., 1976. – 143 с.
18. Зенова, Г. М. Почвенные водоросли и их роль в формировании структуры почвы / Г. М. Зенова, Э. А. Штина // *Почвоведение*. – 1990. – № 10. – С. 104–113.
19. Лукьянов, В. А. Рост и развитие озимой пшеницы с применением культуральной среды от микроводорослей / В. А. Лукьянов, С. Ю. Горбунова, А. И. Стифеев // *Инновации в АПК : проблемы и перспективы*. – 2018. – № 3 (19). – С. 98–103.
20. Батаева, Ю. В. Повышение продуктивности растений защищенного грунта при обработке зелеными микроводорослями и цианобактериями / Ю. В. Батаева, Л. Н. Григорян, А. Д. Батаева // *Экологические системы и приборы*. – 2025. – № 5. – С. 49–54.
21. Гайсина, Л. А. Современные методы выделения и культивирования водорослей : учеб. пособ. / Л. А. Гайсина, А. И. Фазлутдинова, Р. Р. Кабиров. – Уфа : БГПУ, 2008. – 151 с.

Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины

Поступила в редакцию 12.03.2026