

Оценка влияния альгоцианобактериальных комплексов на рост и развитие озимой ржи в модельных экспериментах

Ю.М. Бачура, А.С. Вавилова

Изучено влияние суспензий почвенных микроводорослей родов *Vischeria*, *Chlorella*, цианобактерий рода *Nostoc* и комплексов на их основе на рост и развитие проростков озимой ржи в лабораторных условиях. Показано, что суспензии водорослей и цианобактерий с высокой плотностью клеток обладают большим фитостимулирующим действием. Установлено, что ростостимулирующий эффект комплексов *Nostoc-Vischeria* выше, чем комплексов *Nostoc-Chlorella*; фитозффекты по длине проростков озимой ржи – больше фитозффектов по массе.

Ключевые слова: водоросли, цианобактерии, фитозффекты, ячмень, озимая рожь.

The effect of suspensions of soil microalgae of the genera *Vischeria*, *Chlorella*, cyanobacteria of the genus *Nostoc* and complexes based on them on the growth and development of winter rye seedlings in laboratory conditions was studied. It is shown that suspensions of algae and cyanobacteria with high cell density have a great phytostimulating effect. It was found that the growth-stimulating effect of *Nostoc-Vischeria* complexes is higher than that of *Nostoc-Chlorella* complexes; the phytoeffects on the length of winter rye seedlings are greater than the phytoeffects on the mass.

Keywords: algae, cyanobacteria, phytoeffects, barley, winter rye.

Введение. Водоросли и цианобактерии почв являются ценным и недостаточно изученным возобновляемым ресурсом. Они принимают активное участие во многих процессах, протекающих в почве, способствуют улучшению физико-химических показателей почвы и повышению ее плодородия [1], [2]. Накопление обширного научного и фактического материала способствовало углублению понимания роли почвенно-микробиологических процессов для сельского хозяйства и разработки способов управляемого регулирования взаимодействия высших растений и микроорганизмов в агроэкосистемах. Это обуславливает перспективы для создания полифункциональных альгоцианобактериальных консорциумов, способных вступать во взаимовыгодные отношения с высшими растениями, максимально воспроизводить природные связи агрофитоценозов и реализовывать потенциал почвенных водорослей и цианобактерий в решении проблем повышения продуктивности сельскохозяйственных культур [3], [4]. Целью настоящего исследования являлось изучение влияния альгоцианобактериальных комплексов *Nostoc-Vischeria* и *Nostoc-Chlorella* на рост и развитие проростков озимой ржи в модельных экспериментах.

Материалы и методика исследований. Для получения альгоцианобактериальных комплексов (АЦБК) использовали культуры устойчивой к воздействию неблагоприятных факторов водоросли-космополита *Chlorella vulgaris* Beijerinck, 1890, эвритермной водоросли *Vischeria magna* (J.B. Petersen) Kryvenda, Rybalka, Wolf & Friedl 2018 и цианобактерии-азотфиксатора *Nostoc* sp. Vaucher ex Bornet et Flahault, 1886 [5]. Водоросли культивировали на основной среде Болда (Bold basal medium – ВВМ), цианеи – на среде Болда без азота [6]. Определение количества клеток водорослей и цианобактерий проводили в камере Горяева.

В экспериментах использовали комплексы *Nostoc-Vischeria* и *Nostoc-Chlorella* на основе исходных (ИК) и разбавленных (РК) культур данных микроорганизмов и контрольные варианты: 1) опыт I (ИК/РК культура водоросли); 2) опыт II (1 часть (ИК/РК цианобактерии : 3 части (ИК/РК водоросли, 1N:3V; 1N:3Ch); 3) опыт III (1 часть (ИК/РК цианобактерии : 2 части (ИК/РК водоросли, 1N:2V, 1N:2Ch); 4) опыт IV (1 часть (ИК/РК цианобактерии : 1 часть (ИК/РК водоросли, 1N:1V, 1N:1Ch); 5) опыт V (2 части (ИК/РК цианобактерии : 1 часть

(ИК/ПК водоросли, 2N:1V, 2N:1Ch); 6) опыт VI (3 части (ИК/ПК цианобактерии : 1 часть (ИК/ПК водоросли, 3N:1V, 3N:1Ch); 7) опыт VII (ИК/ПК цианобактерии); 8) контроль I (ВВМ); 9) контроль II (дистиллированная вода). В качестве тестовой культуры использовали озимую рожь (*Secale cereale* L.) сорта Верасень белорусской селекции [7].

Эксперименты проводили в четырехкратной повторности в стандартных и стрессовых условиях. Для создания стрессовых условий применяли сульфат меди (II) в количестве равном 3 мг/кг и 6 мг/кг субстрата, что соответствует предельно допустимой концентрации подвижных форм меди в почве и превышает предельно допустимую концентрацию в два раза. В ходе эксперимента определяли энергию прорастания и всхожесть семян [8], измеряли морфометрические показатели проростков. Статистическую обработку данных проводили с помощью программ Statistica (Version 10) и Microsoft Excel.

Результаты исследований и их обсуждение. Микроводоросли родов *Vischeria* и *Chlorella*, цианобактерии рода *Nostoc* входят в состав рабочей коллекции культур водорослей, созданной на кафедре ботаники и физиологии растений ГГУ им. Ф. Скорины в рамках Научного гербария Белорусского Полесья (GSU). Плотность суспензии *Chlorella vulgaris* составила 42,7–45,1 млн клеток на 1 мл культуры, *Vischeria magna* – 29,7–29,8 млн клеток на 1 мл культуры, *Nostoc* sp. – 25,6–25,8 млн клеток на 1 мл культуры.

При проведении экспериментов с комплексами *Nostoc-Vischeria* на основе исходных суспензий водоросли и цианобактерии энергия прорастания семян варьировала от 75,0 % до 95,0 %; наибольшие значения показателя отмечены в стандартных условиях. Всхожесть семян находилась в пределах от 80,5 % до 95,0 %; значения показателя в стандартных и стрессовых условиях отличались незначительно. В стандартных условиях средняя длина проростков озимой ржи в опытных вариантах была выше средней длины проростков в контрольных вариантах (рисунок 1). Наибольшая средняя длина проростков выявлена в вариантах опыта с комплексом *Nostoc-Vischeria* 1N:2V и исходной суспензией *Vischeria* (228,30 мм), наименьшая – в контроле с дистиллированной водой (180,48 мм). Средняя масса проростков озимой ржи была наибольшей в вариантах опыта с исходной культурой *Vischeria* и комплексом *Nostoc-Vischeria* 1N:3V (0,26 г и 0,25 г). Наименьшая масса отмечена в варианте опыта с исходной культурой *Nostoc* (0,17 г). С увеличением доли цианобактерии в составе комплекса в стандартных условиях отмечено снижение массы проростков озимой ржи. В стрессовых условиях морфометрические показатели озимой ржи были ниже; сохранилась тенденция превалирования длины и массы проростков в опытных вариантах относительно контрольных вариантов. Повышение содержания ионов меди (II) в субстрате от 3 мг/кг до 6 мг/кг привело к увеличению морфометрических показателей озимой ржи. Наиболее активное развитие проростков при внесении ионов меди в количестве 3 мг/кг субстрата наблюдали в вариантах с исходной суспензией *Vischeria* и комплексом 1N:3V (134,40 мм и 132,83 мм); при содержании ионов меди в количестве 6 мг/кг субстрата – в варианте опыта с исходной культурой водоросли (183,81 мм). Средняя масса проростков озимой ржи в стрессовых условиях была наибольшей в варианте опыта с комплексом *Nostoc-Vischeria* 1N:2V при содержании ионов меди в количестве 6 мг/кг субстрата (0,25 г); наименьшей – в контрольных вариантах и в варианте опыта с комплексом *Nostoc-Vischeria* 1N:2V при содержании ионов меди в количестве 3 мг/кг субстрата (по 0,13 г).

При проведении экспериментов с комплексами *Nostoc-Vischeria* на основе разбавленных суспензий водоросли и цианобактерии энергия прорастания семян варьировала от 67,5 % до 95,0 %; наибольшие значения отмечены в стрессовых условиях при содержании ионов меди (II) в количестве 3 мг/кг субстрата. Всхожесть семян находилась в пределах от 72,5 % до 97,5 %; наибольшие показатели выявлены в стрессовых условиях при внесении ионов меди в количестве 6 мг/кг субстрата. В стандартных условиях средняя длина проростков озимой ржи в опытных вариантах была выше, чем в контрольных, кроме варианта опыта с комплексом *Nostoc-Vischeria* 1N:3V. Максимальные показатели средней длины проростков ячменя отмечены в варианте опыта с комплексом *Nostoc-Vischeria* в соотношении 1:1 (245,68 мм); минимальные – в варианте опыта с комплексом 1N:3V (154,35 мм). Максимальная средняя масса проростков озимой ржи выявлена также при использовании комплекса *Nostoc-Vischeria* 1N:1V (0,25 г), минимальная – комплекса 1N:3V (0,15 г). В стрессовых условиях морфометрические показатели озимой ржи были ниже, чем в стандартных условиях; в большинстве опытных вариантов в стрессовых условиях длина и масса проростков были выше, чем в контрольных ва-

риантах. При внесении ионов меди (II) в количестве 3 мг/кг субстрата наиболее активное развитие проростков озимой ржи наблюдали в варианте опыта с комплексом состава 3N:1V (142,33 мм длина и 0,18 г масса), наименее активное – в варианте опыта с разбавленной суспензией *Vischeria* (53,45 мм и 0,12 г соответственно); по длине проростков отмечена тенденция их увеличения при возрастании доли цианобактерии в составе комплекса. При внесении ионов меди в количестве 6 мг/кг субстрата максимальные показатели длины проростков отмечены при применении суспензий *Nostoc* и *Vischeria* (136,18 мм и 134,58 мм соответственно); в вариантах опыта с комплексами *Nostoc-Vischeria* длина проростков была несколько ниже. Масса проростков оказалась наиболее высокой в вариантах с разбавленными суспензиями микроорганизмов и комплексами с преобладанием микроводоросли (0,18–0,19 г).

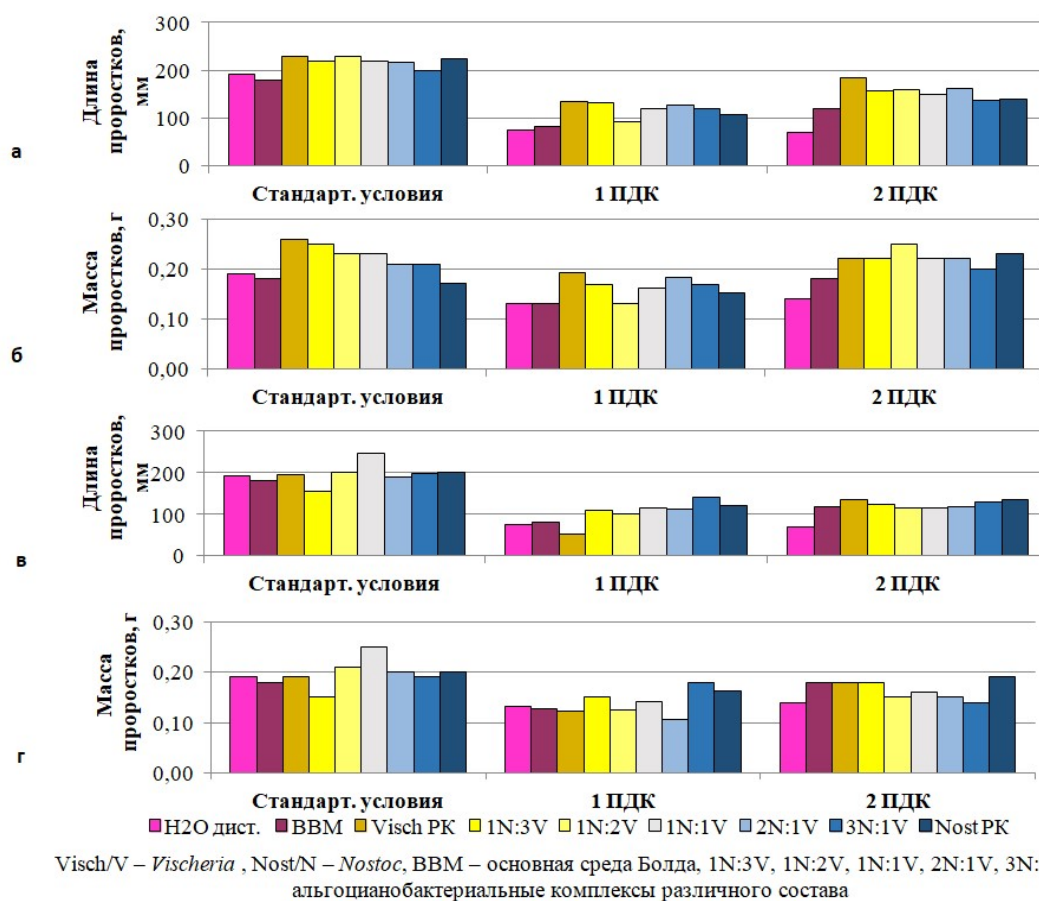


Рисунок 1 – Сравнение длины (а, в) и массы (б, г) проростков озимой ржи, выявленных при использовании АЦБК *Nostoc-Vischeria* на основе исходных (а, б) и разбавленных (в, г) культур микроводорослей и цианобактерий

При проведении экспериментов с комплексами *Nostoc-Chlorella* на основе исходных суспензий водоросли и цианобактерии энергия прорастания семян варьировала от 75,0 % до 95,0 %; наибольшие показатели отмечены при внесении ионов меди (II) в количестве 3 мг/кг субстрата. Всхожесть семян находилась в пределах от 62,5 % до 92,5 %; наибольшие показатели зафиксированы в стандартных условиях. В стандартных условиях средняя длина проростков озимой ржи в вариантах с использованием культур *Chlorella*, *Nostoc* и их комплексов была выше средней длины проростков в обоих контрольных вариантах, за исключением варианта опыта с исходной суспензией водоросли относительно контроля со средой (рисунок 2). Наибольшая средняя длина проростков зафиксирована в варианте опыта с комплексом 2N:1Ch (196,31 мм), значительным показателем был в варианте опыта с использованием исходной суспензии *Nostoc* (185,03 мм). Наименьший показатель средней длины проростков отмечен в контрольном варианте с дистиллированной водой (120,75 мм). Средняя масса проростков озимой ржи была наибольшей в варианте опыта с комплексом 2N:1Ch (0,22 г); наименьшей – в вариантах с дистиллированной водой и комплексом *Nostoc-Chlorella* 1N:1Ch (по 0,13 г).

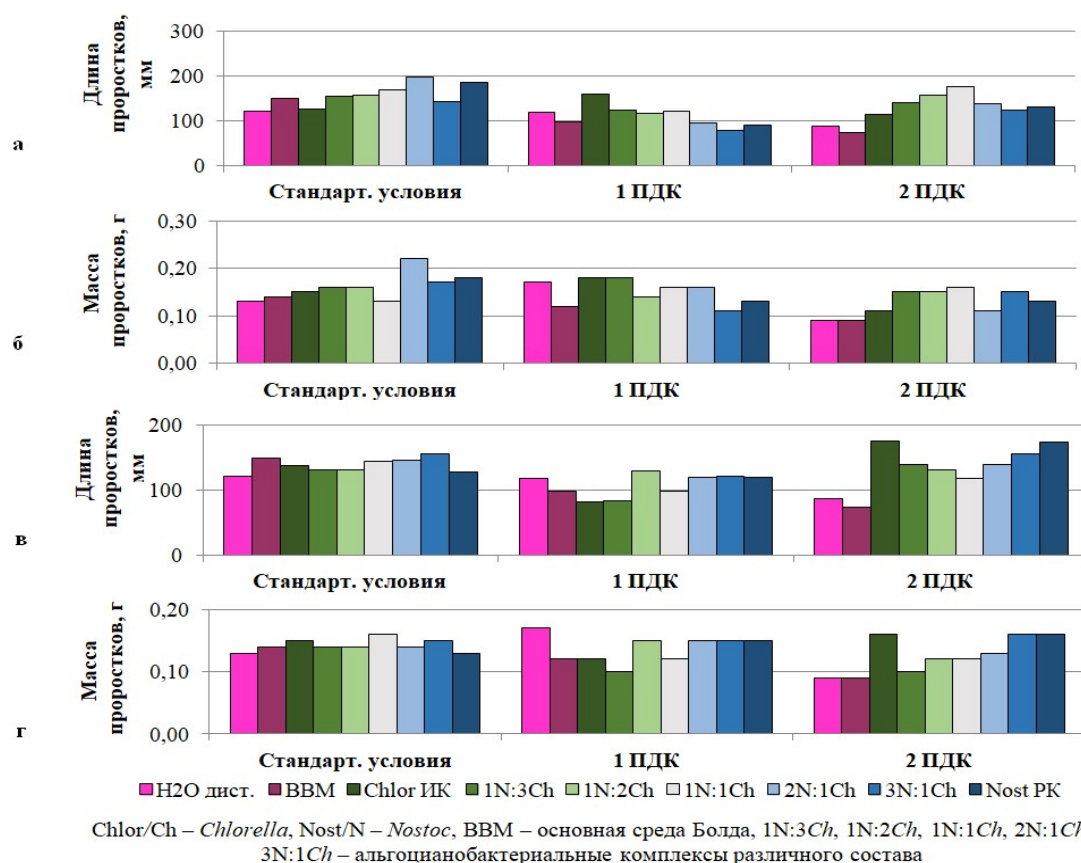


Рисунок 2 – Сравнение длины (а, в) и массы (б, г) проростков озимой ржи, выявленных при использовании АЦБК *Nostoc-Chlorella* на основе исходных (а, б) и разбавленных (в, г) культур микроводорослей и цианобактерий

В стрессовых условиях по сравнению со стандартными длина проростков озимой ржи несколько снизилась; в контрольных вариантах зафиксировано уменьшение длины проростков с увеличением содержания ионов меди (II) в субстрате. При внесении ионов меди в количестве 3 мг/кг субстрата отмечено снижение показателя с возрастанием доли цианобактерии в составе комплекса; при содержании ионов меди 6 мг/кг субстрата выявлено увеличение длины проростков озимой ржи. Наибольшая средняя длина проростков в стрессовых условиях установлена в варианте опыта с комплексом *Nostoc-Chlorella* 1N:1Ch (176,08 мм), наименьшая – в контроле со средой (72,73 мм) при содержании ионов меди, превышающем предельно допустимую концентрацию в два раза. Средняя масса проростков озимой ржи в стрессовых условиях варьировала от 0,11 г до 0,18 г; наибольшие значения массы получены при содержании ионов меди 3 мг/кг субстрата при использовании исходной культуры *Chlorella* и комплекса *Nostoc-Chlorella* 1N:3Ch (по 0,18 г).

При проведении экспериментов с комплексами *Nostoc-Chlorella* на основе разбавленных суспензий водоросли и цианобактерии энергия прорастания семян варьировала от 65,0 % до 95,0 %; значения показателя в стандартных и стрессовых условиях отличались незначительно. Всхожесть семян находилась в пределах от 62,5 % до 90,0 %; наибольшие показатели отмечены в стандартных условиях. В стандартных условиях средняя длина проростков озимой ржи в опытных вариантах была выше, чем в контроле с дистиллированной водой. Наибольшая средняя длина проростков озимой ржи отмечена при использовании комплекса *Nostoc-Chlorella* 3N:1Ch (155,56 мм), наименьшая – в контроле с дистиллированной водой (120,75 мм). Средняя масса проростков была наибольшей в варианте опыта с комплексом *Nostoc-Chlorella* 1N:1Ch (0,16 г). Наименьший показатель массы выявлен в вариантах опыта с дистиллированной водой и исходной суспензией ностока (0,13 г). В стрессовых условиях при внесении ионов меди в количестве 3 мг/кг субстрата отмечено снижение средней длины проростков по сравнению со стандартными условиями. Наибольшие значения показателя выявлены в варианте опыта с комплексом состава 1N:2Ch (129,36 мм), наименьшие – в вариантах опыта с разбавленной суспензией хлореллы и комплексом *Nostoc-Chlorella* в соотношении 1:3 (82,13 мм и 82,68 мм соответственно). Средняя масса проростков озимой ржи бы-

ла наибольшей в варианте опыта с дистиллированной водой (0,17 г); в вариантах опыта с комплексами показатель варьировал от 0,10 г до 0,15 г. Наименьший показатель массы выявлен в варианте опыта с комплексом *Nostoc-Chlorella* в соотношении 1:3 (0,10 г). При увеличении содержания ионов меди до 6 мг/кг субстрата средние показатели длины и массы проростков озимой ржи увеличились; в опытных вариантах длина и масса были выше, чем в контрольных. Наибольшая средняя длина проростков выявлена в вариантах опыта с разбавленными культурами *Nostoc* и *Chlorella* (175,80 мм и 175,33 мм соответственно), наименьшая – в варианте опыта с дистиллированной водой (72,73 мм). Средняя масса проростков озимой ржи была наибольшей в вариантах опыта с разбавленными культурами *Chlorella*, *Nostoc* и комплексом состава 3N:1Ch (0,16 г). Наименьший показатель массы выявлен в вариантах опыта с дистиллированной водой и с основной средой Болда (0,09 г).

Оценка фитостимулирующего действия суспензий водорослей, цианобактерий и их комплексов на длину и массу проростков озимой ржи представлена в таблицах 1, 2. В экспериментах с комплексами *Nostoc-Vischeria* в стандартных условиях максимальная эффективность выявлена при применении комплексов 1N:3V, 1N:2V на основе исходных культур (21–39 %) и 1N:1V на основе разбавленных культур *Nostoc* и *Vischeria* (28–39 %). При использовании комплексов на основе исходных суспензий отмечена тенденция зависимости фитоэффектов по массе проростков озимой ржи от состава комплекса. При содержании ионов меди (II) равном 3 мг/кг субстрата наибольшая эффективность отмечена в вариантах опыта с исходной культурой *Vischeria* и комплексом 3N:1V на основе разбавленных культур; фитоэффекты по длине проростков составили 64–91 %, по массе проростков – 37–50 %. При содержании ионов меди (II) равном 6 мг/кг субстрата максимальные фитоэффекты также отмечены при использовании исходных культур микроорганизмов и их комплексов – по длине проростков в варианте опыта с исходной культурой *Vischeria* (55–165 %), по массе проростков в варианте опыта с комплексом *Nostoc-Vischeria* 1N:2V (39–79 %). По массе проростков озимой ржи отмечена общая тенденция снижения фитоэффектов в стрессовых условиях.

Таблица 1 – Фитоэффекты по длине и массе проростков озимой ржи (АЦБК *Nostoc-Vischeria*)

Варианты опыта		Фитоэффекты													
		по отношению к воде дист.							по отношению к ВВМ						
		Visch	1N:3V	1N:2V	1N:1V	2N:1V	3N:1V	Nost	Visch	1N:3V	1N:2V	1N:1V	2N:1V	3N:1V	Nost
длина	ИК станд	19	14	19	15	13	4	17	26	21	27	22	20	10	24
	ИК 1 пдк	80	78	23	60	71	61	43	64	62	12	46	55	47	30
	ИК 2 пдк	165	126	132	117	132	98	101	55	32	35	27	36	16	17
	РК станд	2	-20	5	28	-1	3	4	9	-14	12	36	5	9	11
	РК 1 пдк	-28	48	36	55	51	91	62	-35	35	23	41	37	74	47
	РК 2 пдк	94	77	67	65	69	85	97	13	3	-2	-4	-1	8	15
масса	ИК станд	37	32	21	21	11	11	-11	44	39	28	28	17	17	-6
	ИК 1 пдк	45	27	-1	23	39	28	15	50	31	2	27	44	32	19
	ИК 2 пдк	57	57	79	57	57	43	64	22	22	39	22	22	11	28
	РК станд	0	-21	11	32	5	0	5	6	-17	17	39	11	6	11
	РК 1 пдк	-7	14	-5	8	-19	37	22	-5	18	-2	11	-16	41	26
	РК 2 пдк	29	29	7	14	7	0	36	0	0	-17	-11	-17	-22	6

Примечание – – 1–20 %, – 21–50 % – выше 51 %

Таблица 2 – Фитоэффекты по длине и массе проростков озимой ржи (АЦБК *Nostoc-Chlorella*)

Варианты опыта		Фитоэффекты													
		по отношению к воде дист.							по отношению к ВВМ						
		Chlor	1N:3Ch	1N:2Ch	1N:1Ch	2N:1Ch	3N:1Ch	Nost	Chlor	1N:3Ch	1N:2Ch	1N:1Ch	2N:1Ch	3N:1Ch	Nost
длина	ИК станд	3	27	29	40	63	17	53	-17	3	4	14	32	-5	24
	ИК 1 пдк	34	5	-2	3	-20	-33	-24	62	26	18	24	-4	-20	-8
	ИК 2 пдк	31	63	81	104	59	43	51	56	93	116	142	89	70	79
	РК станд	13	8	8	19	21	29	6	-8	-13	-12	-3	-2	4	-15

Окончание таблицы 2

	РК 1 пдк	-30	-30	10	-17	2	3	1	-16	-15	33	0	22	24	22
	РК 2 пдк	103	60	51	36	60	79	101	141	91	80	61	90	113	139
масса	ИК станд	15	23	23	0	69	31	38	7	14	14	-7	57	21	29
	ИК 1 пдк	6	6	-18	-6	-6	-35	-24	50	50	17	33	33	-8	8
	ИК 2 пдк	22	67	67	78	22	67	44	22	67	67	78	22	67	44
	РК станд	15	8	8	23	8	15	0	7	0	0	14	0	7	-7
	РК 1 пдк	-29	-41	-12	-29	-12	-12	-12	0	-17	25	0	25	25	25
	РК 2 пдк	78	11	33	33	44	78	78	78	11	33	33	44	78	78
Примечание –		■ – 1–20 %,		■ – 21–50 %		■ – выше 51 %									

При применении комплексов *Nostoc-Chlorella* в стандартных условиях максимальная эффективность выявлена в вариантах опыта с комплексами 2N:1Ch на основе культур с высокой плотностью клеток – фитоэффекты по длине проростков составили 32–63 %, по массе проростков – 57–69 %. При содержании ионов меди (II) равном 3 мг/кг субстрата наибольшая эффективность отмечена в вариантах опыта с исходной культурой *Chlorella* и комплексом состава 1N:2E на основе разбавленных культур *Nostoc* и *Chlorella*; фитоэффекты по длине проростков составили 10–62 %, по массе проростков – 6–50 %. При содержании ионов меди (II) равном 6 мг/кг субстрата максимальные фитоэффекты получены при использовании разбавленных суспензий ностока и хлореллы и комплекса *Nostoc-Chlorella* в соотношении 1:1 на основе исходных культур микроорганизмов – фитоэффекты составили 78–142 %.

Закключение. В ходе проведенных лабораторных экспериментов выполнена оценка влияния суспензий почвенных микроводорослей родов *Vischeria*, *Chlorella*, цианобактерий рода *Nostoc* и комплексов на их основе на рост и развитие проростков озимой ржи. Наибольшее фитостимулирующее действие на озимую рожь в стандартных и стрессовых условиях оказали альгоцианобактериальные комплексы на основе культур микроводорослей и цианобактерий с высокой плотностью клеток. Ростостимулирующий эффект комплексов *Nostoc-Vischeria* был выше, чем комплексов *Nostoc-Chlorella*; фитоэффекты по длине проростков озимой ржи – больше фитоэффектов по массе.

Результаты исследования могут быть использованы в области сельского хозяйства и биотехнологии при изучении биотехнологического потенциала микроводорослей и цианобактерий перспективных для использования в качестве биоудобрений и/или для получения стимуляторов роста высших растений.

Работа выполнена в рамках задания «Разработка альгоцианобактериальных комплексов для использования в качестве стимуляторов роста при возделывании озимой ржи и ячменя» (№ ГР 20211709) ГПНИ «Биотехнологии-2».

Литература

1. Биотехнологический потенциал почвенных цианобактерий (обзор) [Электронный ресурс] / С. В. Дидович [и др.] // Вопросы современной альгологии. – 2017. – № 2 (14). – Режим доступа : <http://algology.ru/1170>. – Дата доступа : 19.07.2023.
2. Одноклеточные водоросли как возобновляемый биологический ресурс : обзор / Г. С. Минюк [и др.] // Морской экологический журнал. – 2008. – № 7. – С. 5–23.
3. Лукьянов, В. А. Прикладные аспекты применения микроводорослей в агроценозе / В. А. Лукьянов, А. И. Стифеев. – Курск : КГСХА, 2014. – 181 с.
4. Михеева, Т. М. Перспективы использования культивируемых и планктонных микроскопических водорослей / Т. М. Михеева // Наука и инновации. – 2018. – № 2 (180). – С. 15–19.
5. The on-line database of cyanobacterial genera [Electronic resource] / J. Komárek, T. Hauer. – Mode of access : <http://www.cyanodb.cz>. – Date of access : 24.01.2023.
6. Гайсина, Л. А. Современные методы выделения и культивирования водорослей : учебное пособие / Л. А. Гайсина, А. И. Фазлутдинова, Р. Р. Кабиров. – Уфа : БГПУ, 2008. – 152 с.
7. Государственный реестр сортов /отв. за вып. В. А. Бейня. – Минск, 2020. – 270 с.
8. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести : ГОСТ 12038-84. – Введ. 01.01.2002. – М. : Изд-во станд., 2001. – 30 с.