

Научная статья  
УДК 633.111.1: 631.461.52  
doi: 10.28983/asj.y2022i12pp15-18

### Роль ризобактерий в формировании фотосинтетического аппарата и продуктивности озимой пшеницы в условиях Левобережья Саратовской области

Анна Анатольевна Беляева<sup>1</sup>, Анатолий Федорович Дружкин<sup>1</sup>, Люся Александровна Тер-Саркисова<sup>1</sup>,  
Оксана Викторовна Ткаченко<sup>1</sup>, Геннадий Леонидович Бурьгин<sup>1,2</sup>, Нина Васильевна Евсеева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова», г. Саратов, Россия

<sup>2</sup>Институт биохимии и физиологии растений и микроорганизмов ФИЦ Саратовский научный центр РАН, г. Саратов, Россия

E-mail: belyaevaanna29@yandex.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается способность штаммов ризобактерий (plant-growth-promoting rhizobacteria, PGPR) *Azospirillum baldaniorum* Sp245, *Azospirillum brasilense* Sp7, *Azospirillum brasilense* SR80, *Azospirillum brasilense* SR88, *Azospirillum brasilense* Cd, *Ochrobactrum cytisi* IPA7.2 и *Enterobacter ludwigii* K7 к стимулированию роста ассимиляционного аппарата и продуктивности озимой мягкой пшеницы сорта Новоершовская в условиях Левобережья Саратовской области. Бактерии стимулировали рост ассимиляционного аппарата растений, кроме того бактерии рода *Azospirillum* в целом более существенно увеличивали чистую продуктивность фотосинтеза. В результате бактериализация существенно увеличивала урожайность озимой мягкой пшеницы на 11–27,7 %.

**Ключевые слова:** *Triticum aestivum* L.; стимулирующие рост растений ризобактерии; бактериализация семян; фотосинтетический аппарат; продуктивность.

**Для цитирования:** Беляева А. А., Дружкин А. Ф., Тер-Саркисова Л. А., Ткаченко О. В., Бурьгин Г. Л., Евсеева Н. В. Роль ризобактерий в формировании фотосинтетического аппарата и продуктивности озимой пшеницы в условиях Левобережья Саратовской области // Аграрный научный журнал. 2022. № 12. С. 15–18. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i12pp15-18>.

#### AGRONOMY

Original article

### The role of rhizospheric bacteria in the formation of photosynthetic apparatus and productivity of winter wheat in the conditions of the Left Bank of the Saratov region

Anna A. Belyaeva<sup>1</sup>, Anatoly F. Druzhkin<sup>1</sup>, Lusya A. Ter-Sarkisova<sup>1</sup>, Oksana V. Tkachenko<sup>1</sup>, Gennadiy L. Burygin<sup>1,2</sup>, Nina V. Evseeva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Saratov State University of Genetics, Biotechnology and Engineering named after N.I. Vavilov, Saratov, Russia

<sup>2</sup>Institute of Biochemistry and Physiology of Plants and Microorganisms – Subdivision of the Federal State Budgetary Research Institution Saratov Federal Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia

E-mail: belyaevaanna29@yandex.ru

**Abstract.** The article discusses the ability of strains of plant-stimulating rhizobacteria (plant-growth-promoting rhizobacteria, PGPR) *Azospirillum baldaniorum* Sp245, *Azospirillum brasilense* Sp7, *Azospirillum brasilense* SR80, *Azospirillum brasilense* SR88, *Azospirillum brasilense* Cd, *Ochrobactrum cytisi* IPA7.2 and *Enterobacter ludwigii* K7 to stimulate the growth of the assimilation apparatus and productivity of winter soft wheat of the Novoershovskaya variety in the conditions of the Left Bank of the Saratov region. The bacteria stimulated the growth of the assimilation apparatus of plants, in addition, the bacteria of the genus *Azospirillum* as a whole more significantly increased the net productivity of photosynthesis. As a result, bacterization significantly increased the yield of winter soft wheat by 11–27,7%.

**Keywords:** *Triticum aestivum* L.; plant-growth-promoting rhizobacteria; bacterization of seeds; photosynthetic apparatus; productivity.

**For citation:** Belyaeva A. A., Druzhkin A. F., Ter-Sarkisova L. A., Tkachenko O. V., Burygin G. L., Evseeva N. V. The role of rhizospheric bacteria in the formation of photosynthetic apparatus and productivity of winter wheat in the conditions of the Left Bank of the Saratov region // Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal. 2022;(12):15–18. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i12pp15-18>.

**Введение.** Озимая мягкая пшеница (*Triticum aestivum* L.) является одной из самых распространенных и важных продовольственных культур в мире, ценность зерна которой определяется высокой питательностью. Это одна из наиболее требовательных к почвенному плодородию и уровню обеспеченности азотом и фосфором злаковых культур.

В современных условиях повышения значимости устойчивого развития земледелия большое внимание при выращивании полевых культур уделяется использованию ризосферных бактерий, способных фиксировать атмосферный азот и повышать доступность фосфора [11]. Экологически безопасные технологии на основе ростостимулирующих препаратов могут способствовать увеличению урожайности сельскохозяйственных культур [10]. Применение препаратов этого класса приводит к сокращению межфазных периодов, увеличению продуктивности, а также антистрессовому эффекту в отношении биотических и абиотических факторов среды [6]. Преимуществом биопрепаратов является низкая стоимость по сравнению с другими, предлагаемыми на рынке.

Для стимулирования роста пшеницы чаще всего применяются бактерии из родов *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Pseudomonas*, *Bacillus* [8]. Многими исследователями отмечалось увеличение всхожести, длины и биомассы проростков при инокуляции семян ризобактериями, ускорение темпов роста растения, увеличение продуктивности фотосинтеза [4, 5].





Эффективность штаммов PGPR зависит от способности колонизировать корни соответствующих растений-хозяев и создавать активные ассоциации. Поэтому необходимо изучение влияния штаммов ризобактерий разных таксономических групп на рост растений, в том числе в стрессовых условиях [1, 3].

Цель данного исследования заключалась в изучении влияния инокуляции семян озимой мягкой пшеницы штаммами ассоциативных ризобактерий различных таксономических групп на формирование фотосинтетического аппарата и продуктивности растений в условиях Левобережья Саратовской области.

**Методика исследований.** Исследования проводили на опытном поле ФГБОУ ВО Вавиловский университет, расположенном в Энгельском районе Саратовской области (координаты местоположения участка 51.114308, 46.024267). Условия опыта богарные. Преобладающий тип почв темно-каштановый. Мощность гумусового горизонта составляет 30 см, содержание гумуса в пахотном слое – 3,0 %. Для группы зерновых культур почвы слабо обеспечены нитратным азотом (6 мг/кг), средне подвижным фосфором (14-20 мг/кг) и имеют высокую обеспеченность калием (свыше 300 мг/кг). Реакция почвенного раствора в верхнем горизонте слабощелочная (рН = 7,0–7,5). В годы исследования (2019–2020, 2021–2022) погодные условия характеризовались как средние, но с неравномерным распределением количества осадков, особенно в критические фазы роста и развития растений.

Объектом исследований служил сорт озимой мягкой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) Новоершовская. Семена перед посевом инокулировали суспензиями штаммов бактерий *Azospirillum baldaniorum* Sp245, *Azospirillum brasilense* Sp7, *Azospirillum brasilense* SR80, *Azospirillum brasilense* SR88, *Azospirillum brasilense* Cd, *Ochrobactrum cytisi* IPA7.2 и *Enterobacter ludwigii* K7, полученными из чистых культур бактерий в логарифмической фазе роста. Штаммы бактерий были взяты из коллекции ризосферных микроорганизмов Института биохимии и физиологии растений и микроорганизмов Российской академии наук (World Data Centre for Microorganisms – WDCM № 1021; <http://collection.ibppm.ru>). Концентрация клеток в суспензии составляла  $10^8$  в 1 мл. Для инокуляции 1 кг семян использовали 70 мл суспензии. Контролем служил вариант без инокуляции бактериями, при этом семена перед посевом обрабатывали водой в таком же количестве, как и варианты, обрабатываемые суспензией бактерий. Площадь опытных делянок составляла 25 м<sup>2</sup>, повторность трехкратная.

Учеты и наблюдения проводили по общепринятым методикам, описанным ранее [12]. Площадь листьев на растениях (см<sup>2</sup>) измеряли в различные фазы роста и развития растений путем взятия растительных образцов с площадок 0,25 м<sup>2</sup> в трехкратной повторности в каждом варианте. Величину ассимиляционного аппарата определяли как суммарную площадь листьев растений в пересчете на 1 га (тыс. м<sup>2</sup>/га). Фотосинтетический потенциал (ФП) определяли как произведение средней величины ассимиляционного аппарата на время его функционирования (тыс. м<sup>2</sup>/га·сут.). Чистую продуктивность (ЧПФ) рассчитывали путем деления конечной величины общего биологического урожая на фотосинтетический потенциал за вегетацию (г/см<sup>2</sup> · сут.). Содержание фотосинтетических пигментов определяли по методике Титова с соавторами [9].

Полученные данные анализировали методом дисперсионного анализа со сравнением частных средних по тесту Дункана с использованием пакета программ AGROS 2.10.

**Результаты исследований.** В осенний период влагообеспечение растений было низким, и стартовый рост растений во всех вариантах был недостаточным. Но весна отличалась повышенным количеством осадков. В этих условиях продолжительность вегетационного периода и наступление фенологических фаз роста растений озимой пшеницы по вариантам существенно не различалась. Максимальная величина ассимиляционного аппарата у всех вариантов достигалась к фазе молочной спелости, кроме варианта с инокуляцией штаммом *A. brasilense* Cd, у которого максимальная площадь листьев формировалась еще к фазе цветения (табл. 1).

Таблица 1

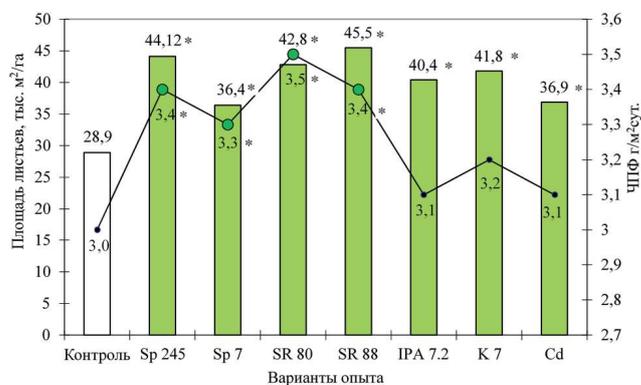
Динамика площади листьев, см<sup>2</sup>/растение, озимой пшеницы сорта Новоершовская под влиянием инокуляции штаммами ризобактерий

Вариант опыта	Фаза вегетации			
	кущение	выход в трубку	цветение	молочная спелость
Контроль	35,80a	106,42a	209,01a	226,09a
<i>A. baldaniorum</i> Sp245	56,49g	122,53ef	247,96e	271,02e
<i>A. brasilense</i> Sp7	49,31e	115,75c	233,96c	259,96c
<i>A. brasilense</i> SR80	42,38bc	128,21g	258,17f	273,11ef
<i>A. brasilense</i> SR88	37,80a	111,85b	207,26a	276,32f
<i>A. brasilense</i> Cd	44,57cd	124,35f	242,6d	233,04b
<i>O. cytisi</i> IPA7.2	55,81fg	105,79a	206,51a	264,74d
<i>E. ludwigii</i> K7	48,20de	120,60de	215,82b	270,28e
$F_{факт}$	30,061*	52,089*	205,593*	263,801*
$HCP_{0,05}$	4,10	3,41	4,22	3,46

Примечание: варианты, достоверно различающиеся при сравнении частных средних по тесту Дункана, обозначены различными буквами латинского алфавита (a, b, ...) при  $P = 95\%$ .

Максимальная величина ассимиляционной поверхности у бактеризованных растений во всех вариантах инокуляции достоверно превосходила контрольные (рис. 1). При этом чистая продуктивность фотосинтеза увеличивалась только в вариантах с инокуляцией штаммами *A. baldaniorum* Sp245 и *A. brasilense* Sp7, SR80, SR88, что говорит о различной эффективности работы фотосинтетического аппарата и утилизации пластических веществ.

Анализ содержания фотосинтетических пигментов в листьях пшеницы в фазу кущения показал, что варианты с инокуляцией бактериями достоверно не отличались от контроля, но различались между собой (табл. 2). Так, содержание хлорофилла *a* и *b* в листьях в варианте с инокуляцией штаммом *A. brasilense* Sp7 существенно превосходило варианты бактеризации другими штаммами азоспирилл.



**Рис. 1. Формирование ассимиляционной поверхности и продуктивность работы фотосинтеза озимой пшеницы сорта Новоершовская под влиянием штаммов ризосферных бактерий. Варианты опыта: Контроль (без бактерий); инокуляция семян штаммами: *A. baldaniorum* Sp245, *A. brasilense* Sp7, *A. brasilense* SR80, *A. brasilense* SR88, *Ochrobactrum cytisi* IPA7.2, *Enterobacter ludwigii* K7, *Azospirillum brasilense* Cd. \* варианты опыта достоверно превышают контроль по результатам дисперсионного анализа ( $P = 95\%$ )**

Таблица 2

**Содержание фотосинтетических пигментов в листьях озимой пшеницы сорта Новоершовская в фазу кушения**

Вариант опыта	Содержание хлорофилла a, мкг/г	Содержание хлорофилла b, мкг/г	Содержание каротиноидов, мкг/г	Соотношение хлорофилла a и b	Соотношение хлорофилла к каротиноидам
Контроль	231,60abc	76,31cd	56,88	3,02	5,41f
<i>A. baldaniorum</i> Sp245	190,29ab	60,09abc	52,76	3,22	4,69de
<i>A. brasilense</i> Sp7	268,94c	87,33d	70,07	3,07	5,06ef
<i>A. brasilense</i> SR80	162,27a	47,38a	54,63	3,45	3,82ab
<i>A. brasilense</i> SR88	164,42a	44,35a	58,57	3,74	3,57a
<i>A. brasilense</i> Cd	183,41ab	50,83ab	54,99	3,60	4,26bcd
<i>O. cytisi</i> IPA7.2	249,53bc	69,92bcd	71,87	3,57	4,45cd
<i>E. ludwigii</i> K7	181,20ab	50,22ab	59,38	3,60	3,89ab
F <sub>факт.</sub>	3,326*	5,411*	1,810	2,260	15,767*
HCP <sub>0,05</sub>	67,39	20,2	—	—	0,49

Примечание: варианты, достоверно различающиеся при сравнении частных средних по тесту Дункана, обозначены различными буквами латинского алфавита (a, b, ...) при  $P = 95\%$ .

Биологическая урожайность растений по вариантам опыта достоверно увеличивалась во всех вариантах инокуляции штаммами ризобактерий в среднем за два года (табл. 3). Минимальная прибавка наблюдалась в варианте с инокуляцией штаммом *A. brasilense* Cd на 0,4 т/га (при HCP<sub>0,05</sub> = 0,39 т/га), что составило 11 %. В остальных вариантах с инокуляцией бактериями прибавка составляла от 0,59 (*O. cytisi* IPA7.2) до 0,99 т/га (*A. brasilense* Sp7), что составило от 16,5 до 27,7 %. Расчет коэффициента корреляции урожайности от площади флагового листа и площади всей листовой поверхности растений показал достоверную зависимость от последнего фактора с коэффициентом корреляции  $r = 0,86$ .

Таблица 3

**Урожайность зерна озимой пшеницы, т/га**

Вариант	2020 г.	2022 г.	В среднем за два года
Контроль	2,11a	5,08a	3,57a
<i>A. baldaniorum</i> Sp245	3,20bc	5,91bc	4,55c
<i>A. brasilense</i> Sp7	3,03bc	6,08c	4,56c
<i>A. brasilense</i> SR80	3,32c	5,53abc	4,43c
<i>A. brasilense</i> SR88	3,18bc	5,32ab	4,25bc
<i>A. brasilense</i> Cd	2,62ab	5,32ab	3,97b
<i>O. cytisi</i> IPA7.2	3,03bc	5,29ab	4,16bc
<i>E. ludwigii</i> K7	3,09bc	5,56abc	4,32bc
F <sub>факт.</sub>	5,021*	3,080*	5,812*
HCP <sub>0,05</sub>	0,52	0,56	0,39

Примечание: варианты, достоверно различающиеся при сравнении частных средних по тесту Дункана, обозначены различными буквами латинского алфавита (a, b, ...) при  $P = 95\%$ .

Анализ полученных данных показывает, что в условиях сухой осени и влажной весны все штаммы ризобактерий способны стимулировать рост растений и формирование фотосинтетического аппарата. Но эффективность биосинтеза пластических веществ между вариантами инокуляции различается, что говорит о сложном характере влияния ризобактерий на биохимические процессы в инокулированных растениях. Ранее, при изучении влияния данных штаммов на рост растений яровой твердой пшеницы, также был показан стимулирующий эффект бактерий [2, 12]. Влияние штаммов азоспирилл было более выраженное, что можно объяснить особенностями генотипа растения-хозяина или яровым образом жизни. В условиях более длинного вегетационного периода и особенностей озимого типа роста растений преимущество проявилось при инокуляции бактериями всех таксономических групп.





Обнаруженная в данном исследовании способность ризосферных бактерий стимулировать рост и продуктивность растений озимой пшеницы коррелирует с данными других авторов. По данным Горского государственного аграрного университета и Всероссийского НИИ сельскохозяйственной микробиологии [7], наблюдения на озимой пшенице показали эффективность применения различных штаммов PGPR. На всех изучаемых вариантах была получена прибавка урожая 5–9 ц/га. Исследования Л.А. Колесникова, А.А. Белимова, П.М. Донес [4] показали увеличение роста элементов продуктивности озимой пшеницы, в том числе было зарегистрировано достоверное увеличение массы 1000 семян на 21–22 %.

**Заключение.** По результатам исследований можно сделать вывод, что обработка семян озимой пшеницы сорта Новоеоршовская ассоциативными ризобактериями в условиях Левобережья Саратовской области может существенно влиять на рост и продуктивность растений. Бактерии стимулировали рост ассимиляционного аппарата растений. Бактерии рода *Azospirillum* более существенно увеличивали чистую продуктивность фотосинтеза. В результате бактериализация существенно увеличивала урожайность озимой мягкой пшеницы от 11 до 27,7 %. Полученные данные могут быть использованы для дальнейшего устойчивого развития агротехнологий при выращивании озимой пшеницы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белимов А. А., Сафронова В. И. Бактериологические методы повышения адаптации растений к абиотическому стрессу // Современное состояние и перспективы развития микробиологии и биотехнологии: материалы междунар. науч.-практ. конф. Минск, 2010. С. 224–226.
2. Влияние ризобактерий на продуктивность яровой твердой пшеницы / А.А. Беляева [и др.] // Вавиловские чтения-2019: сборник статей междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 132-й годовщине со дня рождения академика Н.И. Вавилова. Саратов, 2019. С. 15–16.
3. Иммуитет, адаптивность и качество сортов яровой твердой пшеницы в регионе Среднего Поволжья / М.В. Беляева [и др.]. Самара, 2018. 49 с.
4. Колесников Л. Е., Белимов А. А., Донес П. М. Биологическая эффективность ассоциативных штаммов ризобактерий в посевах мягкой пшеницы // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2019. № 1 (54). С. 57–64.
5. Мирзоева О. В., Широких И. Г. Образование ауксинов эндوفитными актинобактериями озимой ржи // Прикладная биохимия и микробиология. 2010. Т. 46. № 1. С. 51–57.
6. Моргун В. В., Котц С. Я., Кириченко Е. В. Ростостимулирующие ризобактерии и их практическое применение // Физиология и биохимия культурных растений. 2009. Т. 41. № 3. С. 187–207.
7. Пухаев А. Р., Фарниев А.Т., Кожемяков А.П. Эффективность новых штаммов ассоциативных ризобактерий на посевах озимой пшеницы // Сельское хозяйство. 2009. № 8. С. 40–41.
8. Эффективность инокуляции микроплантатов картофеля, выращенных *in vitro*, ризосферными бактериями рода *Azospirillum* / К.Ю. Каргаполова [и др.] // Культура растительных клеток, тканей и органов (РСТОС). 2020. 141. С. 351–359.
9. Титов А.Ф., Таланова В. В., Казнина Н. М. Практикум по курсу «Физиологические основы устойчивости растений к тяжелым металлам». Петрозаводск, 2013. 63 с.
10. Nwachukwu B. C., Babalola O. O. Perspectives for sustainable agriculture from the microbiome in plant rhizosphere // Plant Biotechnol Rep. 2021. No. 15. 259–278. <https://doi.org/10.1007/s11816-021-00676-3>.
11. Plant growth promoting rhizobacteria in sustainable agriculture: from theoretical to pragmatic approach / S. Mustafa et al. // Symbiosis. 2019. No. 78. 115–123. <https://doi.org/10.1007/s13199-019-00602-w>.
12. Study of the effect of associative rhizobacterial strains on the formation of spring durum wheat productivity / A.A. Belyaeva et al. // BIO Web Conf. II International Scientific Conference «Plants and Microbes: The Future of Biotechnology» (PLAMIC2020) Section «Plant-Microbe Symbiosis, Including Natural and Artificial Symbiotic Systems». Vol. 23. No. 03012. 2020. Published online 14 August 2020. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202303012>

#### REFERENCES

1. Belimov A. A., Safronova V. I. Bacteriological methods of increasing plant adaptation to abiotic stress. *Current state and prospects of development of microbiology and biotechnology*. Minsk, 2010: 224226. (In Russ.).
2. The influence of rhizobacteria on the productivity of spring durum wheat / A.A.Belyaeva et al. *Vavilov readings-2019*. Saratov, 2019: 15–16. (In Russ.).
3. Immunity, adaptability and quality of spring durum wheat varieties in the Middle Volga region / M. V. Belyaeva et al. Samara, 2018. 49 p. (In Russ.).
4. Kolesnikov L.E., Belimov A. A., Dones P. M. Biological efficiency of associative strains of rhizobacteria in soft wheat crops. *Izvestiya of St. Petersburg State Agrarian University*. 2019; 1 (54): 57–64. (In Russ.).
5. Mirzoeva O. V., Shirokikh I. G. Formation of auxins by endophytic actinobacteria of winter rye. *Applied biochemistry and microbiology*. 2010; 46; 1: 51–57. (In Russ.).
6. Morgun V.V., Kotz S.Ya., Kirichenko E. V. Growth-stimulating rhizobacteria and their practical application. *Physiology and biochemistry of cultivated plants*. 2009; 41; 3: 187–207. (In Russ.).
7. Pukhaev A. R., Farniev A. T., Kozhemyakov A. P. Efficiency of new strains of associative rhizobacteria on winter wheat crops. *Agriculture*. 2009; 8: 40–41. (In Russ.).
8. Efficiency of inoculation of potato microplants grown *in vitro* by rhizospheric bacteria of the genus *Azospirillum* / K. Yu. Kargaplova et al. *Culture of plant cells, tissues and organs (PCTOC)* 141. 2020:351–359. (In Russ.).
9. Titov A. F., Talanova V. V., Kaznina N. M. Workshop on the course «Physiological foundations of plant resistance to heavy metals». Petrozavodsk, 2013. 63 p. (In Russ.).
10. Nwachukwu B. C., Babalola O. O. Perspectives for sustainable agriculture from the microbiome in plant rhizosphere. *Plant Biotechnol Rep*. 2021; 15: 259–278. <https://doi.org/10.1007/s11816-021-00676-3>.
11. Plant growth promoting rhizobacteria in sustainable agriculture: from theoretical to pragmatic approach / S. Mustafa et al. *Symbiosis*. 2019; 78: 115–123. <https://doi.org/10.1007/s13199-019-00602-w>
12. Study of the effect of associative rhizobacterial strains on the formation of spring durum wheat productivity / A.A. Belyaeva et al. *BIO Web Conf. II International Scientific Conference «Plants and Microbes: The Future of Biotechnology» (PLAMIC2020) Section «Plant-Microbe Symbiosis, Including Natural and Artificial Symbiotic Systems»*. 2020; 23; 03012. Published online 14 August 2020. DOI: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20202303012>

Статья поступила в редакцию 04.06.2022; одобрена после рецензирования 25.07.2022; принята к публикации 05.08.2022.  
The article was submitted 04.06.2022; approved after reviewing 25.07.2022; accepted for publication 05.08.2022.