

Оценка микробно-растительных взаимодействий в биосистеме *Oriza sativa* L. (риса посевного)

А. И. Якубовская^{1✉}, Я. В. Пухальский², Н. И. Воробьев³, И. А. Каменева¹,
М. В. Гритчин¹, А. Ю. Еговцева¹

¹ Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, Симферополь, Россия

² Ленинградский государственный университет имени А. С. Пушкина, Санкт-Петербург, Пушкин, Россия

³ Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии, Санкт-Петербург, Пушкин, Россия

✉ E-mail: yakubovskaya_alla@mail.ru

Аннотация. Одним из факторов эффективного функционирования растительно-микробной биосистемы является биоконсолидация микроорганизмов вокруг общей стратегии взаимодействия с растениями, при которой устанавливаются особые фрактальные соотношения численностей микроорганизмов ризосферы. **Цель** исследования – анализ зависимости уровня биоконсолидации почвенных микроорганизмов в периоды кущения, цветения и созревания риса (*Oriza sativa* L.) от интродукции ассоциативных с растением штаммов бактерий. При этом считается, что вычисленный нейросетью NONN уровень биоконсолидации почвенных микроорганизмов является мерой сравнения вариантов опыта и выбора варианта, в котором инокулянт инициировал наибольшую интенсивность масс-накопительных микробиологических, биохимических процессов в ризосфере риса во все фазы онтогенеза растений. Объектом исследований являлись численные показатели основных эколого-трофических групп микроорганизмов ризосферы, каталазы, коэффициенты, характеризующие направленность минерализационных процессов азота, урожай зерна риса. Закладка опытов, отбор почвенных проб ризосферы, микробиологический и биохимический анализы, учет урожая осуществляли общепринятыми **методами**. Индекс CSI, который в наших исследованиях характеризует биоконсолидацию микроорганизмов в ризосфере, рассчитывали с использованием нейросети NONN по алгоритму, включающему 8 этапов преобразования данных. **Результаты.** Установлено, что из исследуемых инокулянтов *Agrobacterium tumefaciens* стимулирует биоконсолидацию почвенной микрофлоры в ризосфере, интенсифицирует масс-накопительные процессы в растении и повышает урожай культуры. Нейросетью NONN предложена смесь штаммов *Agrobacterium tumefaciens* 32-3 и *Flavobacterium* sp. 72, которая способна усилить эффект предпосевной бактериализации семян путем повышения урожая растений риса. **Научная новизна.** Впервые с помощью новейшей нейросетевой информационной технологии извлечена информация о биоконсолидации почвенных микроорганизмов под действием инокулянта, что позволило определить бактерии для предпосевной обработки семян риса, обеспечивающие эффективность микробно-растительного взаимодействия (прибавку урожайности).

Ключевые слова: фрактальный профиль и индекс биоконсолидации почвенных микроорганизмов, микробиологические препараты, вычислительная нейронная сеть

Благодарности. Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации FNZW-2022-0005 «Функциональные особенности растительно-микробного взаимодействия в управлении стрессоустойчивостью, продуктивностью агрофитоценозов и реализации потенциала микробных препаратов нового поколения».

Для цитирования: Якубовская А. И., Пухальский Я. В., Воробьев Н. И., Каменева И. А., Гритчин М. В., Еговцева А. Ю. Оценка микробно-растительных взаимодействий в биосистеме *Oriza sativa* L. (риса посевного) // Аграрный вестник Урала. 2025. Т. 25, № 04. С. 564–575. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-04-564-575>.

Дата поступления статьи: 27.09.2024, **дата рецензирования:** 02.12.2024, **дата принятия:** 14.02.2025.

Assessment of microbial-plant interactions in the *Oriza sativa* L. biosystem (seeded rice)

A. I. Yakubovskaya^{1✉}, Ya. V. Pukhalskiy², N. I. Vorobyev³, I. A. Kameneva¹,
M. V. Gritchin¹, A. Yu. Egovtseva¹

¹ Scientific Research Institute of Agriculture of Crimea, Simferopol, Russia

² Pushkin Leningrad State University, Saint Petersburg, Pushkin, Russia

³ All-Russian Research Institute of Agricultural Microbiology, Saint Petersburg, Pushkin, Russia

✉ E-mail: yakubovskaya_alla@mail.ru

Abstract. One of the factors of effective functioning of plant-microbial biosystem is bioconsolidation of microorganisms around the general strategy of interaction with plants, in which special fractal ratios of numbers of rhizosphere microorganisms are established. **The purpose** of the study is to analyze the dependence of the level of bioconsolidation of soil microorganisms during the periods of tillering, flowering and ripening of rice plants on the introduction of associative strains. The level of bioconsolidation of soil microorganisms calculated by the NONN neural network is a measure of comparison of experimental variants and selection of the variant in which the microbiological preparation initiated the highest intensity of mass accumulative biochemical processes in rice plants in all phases of plant ontogenesis. The quantitative indicators of the main ecological-trophic groups of rhizosphere microorganisms, catalase, coefficients characterizing the direction of nitrogen mineralization processes, and rice grain yield were the object of research. The experiments were set up, soil samples were collected from the rhizosphere, microbiological and biochemical analyses were performed, and the yield was recorded using conventional **methods**. The CSI index, which characterizes the bioconsolidation of microorganisms in the rhizosphere in our studies, was calculated using the NONN neural network using an algorithm that includes 8 stages of data transformation. **Results.** It was found that *Agrobacterium tumefaciens*, from the studied inoculants, stimulates bioconsolidation of soil microflora in the rhizosphere, intensifies mass accumulative processes in plants and increases crop yield. The NONN neural network has proposed a mixture of *Agrobacterium tumefaciens* 32-3 and *Flavobacterium* sp. 72 strains, which can increase the effect of pre-sowing bacterization of seeds by increasing the yield of rice plants. **Scientific novelty.** For the first time, information on the bio-consolidation of soil microorganisms under the action of an inoculant has been extracted using the latest neural network information technology, which made it possible to identify bacteria for the pre-sowing treatment of rice seeds that ensure the effectiveness of microbial-plant interaction (increased yield).

Keywords: fractal profile and bioconsolidation index of soil microorganisms, microbiological preparations, computational neural network

Acknowledgements. The research was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation FNZW-2022-0005 “Functional features of plant-microbial interaction in managing stress resistance, productivity of agrophytocenoses and realizing the potential of new generation microbial preparations.”

For citation: Yakubovskaya A. I., Pukhalskiy Ya. V., Vorobyev N. I., Kameneva I. A., Gritchin M. V., Egovtseva A. Yu. Assessment of microbial-plant interactions in the *Oriza sativa* L. biosystem (seeded rice). *Agrarian Bulletin of the Urals*. 2025; 25 (04): 564–575. <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2025-25-04-564-575>. (In Russ.)

Date of paper submission: 27.09.2024, **date of review:** 02.12.2024, **date of acceptance:** 14.02.2025.

Постановка проблемы (Introduction)

Для микроорганизмов почва является естественной средой обитания и местом их прогрессивной преобразовательной деятельности. В период вегетации растений почвенные микроорганизмы включаются во взаимодействие с растениями и стимулируют их рост, а в межвегетационный период трансформируют растительные остатки в гумусовые и питательные вещества, поддерживая плодородие почв и высокую продуктивность сельскохозяйственных растений [1–3].

Поддержание плодородия почв возможно при использовании микробных препаратов, биоагенты которых являются чувствительными индикаторами землепользования. Интродуцируемые бактерии взаимодействуют как с высшими растениями, так и с аборигенной микробиотой почвы, что приводит к установлению взаимозависимых отношений (сим-

родие почв и высокую продуктивность сельскохозяйственных растений [1–3].
Поддержание плодородия почв возможно при использовании микробных препаратов, биоагенты которых являются чувствительными индикаторами землепользования. Интродуцируемые бактерии взаимодействуют как с высшими растениями, так и с аборигенной микробиотой почвы, что приводит к установлению взаимозависимых отношений (сим-

биозу), которые и определяют эффективность растительно-микробного взаимодействия, количественное и качественное разнообразие биоты, ее активность в ризосфере, что влияет на доступность и обеспеченность растений элементами питания и формирование потенциально возможных урожаев [4–10].

Особый интерес представляют почвы рисовых полей, так как рисовый агроценоз формируется в условиях периодического затопления, что усложняет физические и биохимические процессы в почве и отличает их от багровых агроценозов или почв постоянно увлажненных (болот, например). Специфичный водно-воздушный и окислительно-восстановительный режимы почв рисовников оказывают влияние на интенсивность (лабильность) миграции по профилю химических соединений, элементов, скорость протекания микробиологических и биохимических процессов [11].

В результате многолетних исследований получен массив данных по микробиологическому анализу почвы и влиянию интродукции ассоциативных штаммов на растения, продуктивность [12].

В настоящее время, учитывая мировую значимость системы органического земледелия, экологичным и экономичным элементом технологии выращивания риса является интродукция в ризосферу полифункциональных бактерий с высокой степенью ассоциативности. Такой агроприем позволит стимулировать создание и функционирование растительно-микробных биосистем, которые способствуют повышению иммунного статуса растений, и равновесное прохождение всех фаз развития культуры, повышая обеспеченность микро- и макроэлементами, способствуя повышению качества продукции.

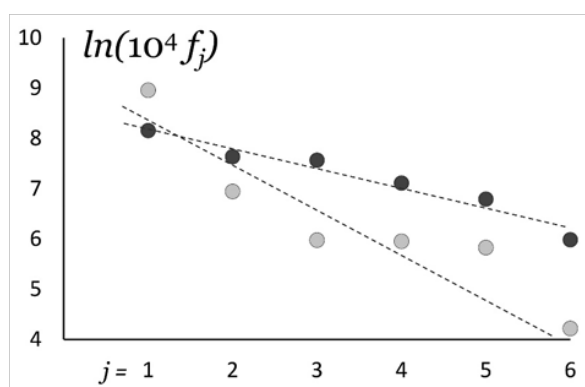


Рис. 1. Логарифмические фрактальные профили микроорганизмов, демонстрирующие различные отклонения их от идеальных профилей (пунктирных линий). f_j, j – частота встречаемости и порядковый номер позиции микроорганизмов во фрактальном профиле

Fig. 1. Logarithmic fractal profiles of microorganisms, demonstrating their various deviations from ideal profiles (dotted lines). f_j, j – the frequency of occurrence and the ordinal number of the position of microorganisms in the fractal profile

В биосистемах происходит биоконсолидация микроорганизмов вокруг общей стратегии взаимодействия с растениями, устанавливаются особые фрактальные соотношения численностей микроорганизмов [13; 14]. Фрактальность микробных взаимодействий можно характеризовать фрактальным профилем микроорганизмов, в котором численности микроорганизмов образуют убывающий числовой ряд (рис. 1).

Среди возможных форм фрактальных профилей почвенных микроорганизмов выделяется форма «идеальный профиль», соответствующая геометрическому цифровому ряду (например, ряду: 0,1, 0,01, 0,001, ...). Фрактальные профили микроорганизмов можно составить из численностей аммонификаторов, амилаolitikов, диазотрофов, фосфатмобилизаторов, микромицетов и целлюлозолитиков, которые можно определить методом посева почвенной суспензии на селективные среды [15; 16], или из численностей таксономических групп почвенных микроорганизмов, которые можно определить молекулярно-генетическим методом [17; 18]. Оба метода дают объективное представление о фрактальности биосистемы микроорганизмов, а также об отклонении фактического профиля от идеального и об уровне биоконсолидации микроорганизмов. Фрактальные профили, полученные двумя методами, отличаются разрешением: молекулярно-генетический метод предоставляет сотню тысяч таксонов, метод селективных сред предоставляет десяток физиологических групп микроорганизмов. Несмотря на это, профили позволяют извлечь из них информацию о фрактальности микробной биосистемы и об уровне биоконсолидации микроорганизмов.

Мы выбрали идеальный профиль в качестве опорного базиса, относительно которого рассчитывается величина отклонения фактического фрактального профиля микроорганизмов. Кроме этого, мы предположили, что снижение уровня биоконсолидации микроорганизмов является количественным индикатором снижения организованности биосистемы микроорганизмов или свидетельствует об отрицательном воздействии внешних биотических и абиотических факторов на организацию микробно-растительной биосистемы.

В качестве цифрового индикатора уровня биоконсолидации микроорганизмов нами был выбран безразмерный индекс биоконсолидации микроорганизмов $CSI = 0 \dots 10$, подобный индексу когнитивной значимости цифровых данных (Cognitive Salience Index) [19; 20]. Чтобы вычислить индекс CSI, нами было решено использовать вычислительную нейросеть NONN, которая преобразует в индекс данные фрактального профиля почвенных микроорганизмов (рис. 2) [21–23]. При этом предполагалось, что в алгоритм нейросети NONN будут включены вычислительные процедуры регрессионного, корре-

ляционного, кластерного и дискриминантного статистических анализов. Дополнительно в нейросеть NONN будет включен сервис настройки-обучения нейросети Learning, который обеспечивает открытый доступ к программному коду нейросети. Циклический сервис Learning позволяет менять алгоритм вычислений нейросети, что необходимо при поиске корректного вычисления индекса CSI [24–27].

Целью данного исследования являлся анализ зависимости уровня биоконсолидации почвенных микроорганизмов в периоды кущения, цветения и созревания растений риса от предпосевной обработки семян риса микробиологическими препаратами. При этом считается, что вычисленный нейросетью NONN уровень биоконсолидации почвенных микроорганизмов будет мерой сравнения вариантов опыта и выбора варианта, в котором микробиологический препарат инициировал наибольшую интенсивность масс-накопительных биохимических процессов в растениях риса на всех этапах онтогенеза растений.

Методология и методы исследования (Methods)

Для исследования зависимости урожайности растений риса *Oriza sativa* L. от уровня биоконсолидации ризосферной почвенной микрофлоры и влияния предпосевной обработки семян риса микробиологическими препаратами на продуктивность растений были проведены в 2012, 2013 годах модельно-полевые опыты на базе ООО «Осавиахим» (Краснопереконский район, Крым).

Лугово-каштановая почва рисовников Краснопереконского района обладает высокой водоудерживающей способностью. Содержание гумуса в верхнем слое почвы составляет 2,0–2,2 %, с глубиной этот показатель уменьшается. Мощность гумусового горизонта – 20–25 см. Сильно- и среднесолонцеватые почвы: на глубине 2 м залегают гипс и малорастворимые соли, на 3–5 м от поверхности залегают грунтовые воды.

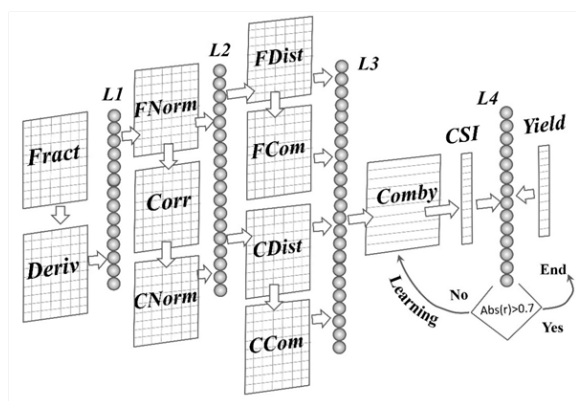


Рис. 2. Нейросеть NONN, вычисляющая индексы биоконсолидации CSI путем математического преобразования фрактальных профилей физиологических групп микроорганизмов

Fig. 2. NONN neural network, calculating the indices of bio-consolidation of CSI by mathematical transformation of fractal profiles of physiological groups of microorganisms

В рамках традиционной для региона технологии возделывания риса были проведены эксперименты с бактеризацией семян ассоциативными с растением штаммами бактерий из Крымской коллекции микроорганизмов (<http://ckp-rf.ru/usu/507484/>): *Agrobacterium tumefaciens* 32, *Phyllobacterium ifriqiense* 6, *Flavobacterium sp.* 72 и микробиологическим препаратом «Азостим-Агро», применяемым для предпосевной инокуляции семян с целью улучшения азотного питания, стимуляции роста, повышения устойчивости растений к стресс-факторам, прибавке урожайности (10–30 %), улучшению качества полученной продукции и ее конкурентоспособности. Биоагентом «Азостим-Агро» является штамм бактерий *Agrobacterium radiobacter*. Предпосевная бактеризация семян осуществлялась из расчета 550 тыс. клеток на семя. Она была приготовлена так, как описано в работах [12; 28]. Штаммы с высокой степенью ассоциативности к растениям риса (*Agrobacterium tumefaciens* 32, *Phyllobacterium ifriqiense* 6, *Flavobacterium sp.* 72) депонированы в Сетевой биоресурсной коллекции в области генетических технологий для сельского хозяйства как хозяйственно ценные; на 2 из них (*Phyllobacterium ifriqiense* 6, *Flavobacterium sp.* 72) получены патенты. Контрольные семена обрабатывали водой. Планирование эксперимента и учет проводили по Доспехову [29]. Площадь каждого варианта составляла 0,25 га.

Схема опыта предполагала следующие варианты:

1. Контрольный вариант без обработки семян микробиологическим препаратом.
2. Обработка семян «Азостимом» (*Agrobacterium (Rhizobium) radiobacter*).
3. Обработка семян риса *Agrobacterium tumefaciens*.
4. Обработка семян риса *Phyllobacterium ifriqiense*.
5. Обработка семян риса *Flavobacterium sp.*

Почвенные образцы для микробиологического и биохимического анализов отбирали по фазам кущения, цветения и созревания растений риса в июне, августе и сентябре соответственно. Определение количественного и качественного состава ризосферных микроорганизмов проводили глубинным посевом на элективные среды, расчет коэффициента минерализации-иммобилизации азота (коэфф. мин/имм азота) – согласно общепринятым методам [16]. Количество микроорганизмов выражали в млн и тыс. колониеобразующих единиц (КОЕ) в 1 грамме абсолютно сухой почвы (а. с. п.). Определение активности фермента класса оксидоредуктаз (каталаза) в ризосферной почве осуществлялось газометрическим методом, предложенным Галстяном [16] в мл O_2 в 1 г почвы за 1 мин. Анализ биологической урожайности риса

и структурных элементов продуктивности осуществлен путем отбора снопового материала перед уборкой. Повторность опыта шестикратная. Биологическая урожайность зерна риса определена через систему индексов [30]. Статистическую обработку данных проводили с использованием программ Microsoft Excel 2007, полученные результаты приведены в виде средних арифметических значений со стандартными ошибками ($M \pm SEM$).

Индекс CSI, который в наших исследованиях характеризует биоконсолидацию микроорганизмов в ризосфере, рассчитывали с использованием нейросети NONN по алгоритму, включающему 8 этапов преобразования данных [31; 32], подробно описанных в разделе «Результаты».

Задачей исследования был выбор микробиологического препарата, стимулирующего биоконсолидацию почвенной микрофлоры, интенсифицирующего масс-накопительные процессы в растениях (на стадиях онтогенеза растений: кущения, цветения и созревания) и повышающего урожай риса.

Результаты (Results)

Результаты исследований показали, что инокуляция ассоциативными штаммами бактерий способствует увеличению численности отдельных эколого-трофических групп микроорганизмов: аммонификаторов, аминолитиков, diaзотрофов (таблица 1) и стимулирует окислительно-восстановительные процессы (каталазную активность) в ризосфере относительно контрольного варианта по фазам развития растений.

Таблица 1
Почвенные микробиологические (КОЕ в 1 г абсолютно сухой почвы) и биохимические (мл O_2 в 1 г почвы за 1 мин.), урожайные данные растений риса (т/га). Индексы CSI

Параметры исследований	Технологии предпосевной обработки семян риса				
	Контроль	«Азостим-Агро»	<i>A. tumefaciens</i> 32	<i>Ph. ifriqiense</i> 6	<i>Flavobacterium</i> sp. 72
Фаза кущения растений					
Амилолитики, 10^6	13,5	8,5	7,5	43,6	6,2
Аммонификаторы, 10^6	5,4	4,2	8,7	9,3	6,6
Диазотрофы, 10^6	51,0	36,0	171,7	70,8	77,1
Фосфатмобилизаторы, 10^6	3,3	2,1	1,5	6,5	2,0
Микромицеты, 10^4	17,0	20,5	22,9	24,9	33,4
Целлюлозолитики, 10^4	14,5	11,5	8,5	12,5	9,6
Каталазная активность, мл O_2 / г/мин	4,8	6,0	7,0	7,2	6,5
Коэфф. мин/имм азота	0,4	0,5	1,2	0,2	1,1
Индекс CSI, $\pm 0,2$	2,3	3,4	5,1	4,3	4,5
Фаза цветения растений					
Амилолитики, 10^6	19,0	10,1	8,5	45,0	8,5
Аммонификаторы, 10^6	5,9	4,5	8,8	8,8	6,4
Диазотрофы, 10^6	54,0	39,5	174,4	64,0	77,1
Фосфатмобилизаторы, 10^6	37,0	21,9	16,5	58,0	19,3
Микромицеты, 10^4	18,0	23,5	25,1	23,0	30,6
Целлюлозолитики, 10^4	14,5	13,9	10,7	10,5	11,9
Каталазная активность, мл O_2 / г/мин	0,9	1,7	2,2	3,4	3,8
Коэфф. мин/имм азота	0,3	0,5	1,0	0,2	0,8
Индекс CSI, $\pm 0,2$	2,3	4,4	4,8	6,5	7,2
Фаза созревания растений					
Амилолитики, 10^6	12,0	6,4	16,5	30,5	15,3
Аммонификаторы, 10^6	3,4	2,7	2,9	2,6	4,9
Диазотрофы, 10^6	31,4	44,0	38,8	35,2	35,1
Фосфатмобилизаторы, 10^6	34,2	43,1	75,5	44,6	43,3
Микромицеты, 10^4	33,5	29,3	33,1	30,0	55,5
Целлюлозолитики, 10^4	14,5	14,4	18,7	26,5	14,2
Каталазная активность, мл O_2 / г/мин	4,1	6,0	5,0	3,8	5,0
Коэфф. мин/имм азота	0,3	0,4	0,2	0,1	0,3
Индекс CSI, $\pm 0,2$	5,9	5,4	6,6	6,4	6,0

Table 1

Soil microbiological (CFU/g of absolutely dry soil) and biochemical (ml of O₂ / g of soil in 1 min), yield data of rice plants (t/ha). CSI indexes

Studied parameters	Technologies of pre-sowing processing of rice seeds				
	Control	“Azostim-Agro”	<i>A. tumefaciens</i> 32	<i>Ph. ifriqiense</i> 6	<i>Flavobacterium</i> sp. 72
The tillering phase of plants					
<i>Amylolytic</i> , 10 ⁶	13.5	8.5	7.5	43.6	6.2
<i>Ammonifiers</i> , 10 ⁶	5.4	4.2	8.7	9.3	6.6
<i>Diazotrophs</i> , 10 ⁶	51.0	36.0	171.7	70.8	77.1
<i>Phosphate solubilizer</i> , 10 ⁶	3.3	2.1	1.5	6.5	2.0
<i>Micromycetes</i> , 10 ⁴	17.0	20.5	22.9	24.9	33.4
<i>Cellulolytics</i> , 10 ⁴	14.5	11.5	8.5	12.5	9.6
<i>Catalase activity</i> , ml O ₂ / g/min	4.8	6.0	7.0	7.2	6.5
<i>Coefficient of mineralization/immobilization of nitrogen</i>	0.4	0.5	1.2	0.2	1.1
<i>Index CSI, ±0.2</i>	2.3	3.4	5.1	4.3	4.5
The flowering phase of plants					
<i>Amylolytic</i> , 10 ⁶	19.0	10.1	8.5	45.0	8.5
<i>Ammonifiers</i> , 10 ⁶	5.9	4.5	8.8	8.8	6.4
<i>Diazotrophs</i> , 10 ⁶	54.0	39.5	174.4	64.0	77.1
<i>Phosphate solubilizer</i> , 10 ⁶	37.0	21.9	16.5	58.0	19.3
<i>Micromycetes</i> , 10 ⁴	18.0	23.5	25.1	23.0	30.6
<i>Cellulolytics</i> , 10 ⁴	14.5	13.9	10.7	10.5	11.9
<i>Catalase activity</i> , ml O ₂ / g/min	0.9	1.7	2.2	3.4	3.8
<i>Coefficient of mineralization/immobilization of nitrogen</i>	0.3	0.5	1.0	0.2	0.8
<i>Index CSI, ±0.2</i>	2.3	4.4	4.8	6.5	7.2
The phase of plant maturation					
<i>Amylolytic</i> , 10 ⁶	12.0	6.4	16.5	30.5	15.3
<i>Ammonifiers</i> , 10 ⁶	3.4	2.7	2.9	2.6	4.9
<i>Diazotrophs</i> , 10 ⁶	31.4	44.0	38.8	35.2	35.1
<i>Phosphate solubilizer</i> , 10 ⁶	34.2	43.1	75.5	44.6	43.3
<i>Micromycetes</i> , 10 ⁴	33.5	29.3	33.1	30.0	55.5
<i>Cellulolytics</i> , 10 ⁴	14.5	14.4	18.7	26.5	14.2
<i>Catalase activity</i> , ml O ₂ / g/min	4.1	6.0	5.0	3.8	5.0
<i>Coefficient of mineralization/immobilization of nitrogen</i>	0.3	0.4	0.2	0.1	0.3
<i>Index CSI, ±0.2</i>	5.9	5.4	6.6	6.4	6.0

Этапы вычислений нейросети NONN

I этап. Слой нейронов L1 упорядочивает микробиологические данные (таблица 1) во фрактальные профили микроорганизмов (матрица Fract) и преобразует данные матрицы Fract по формуле (1) в данные матрицы Deriv.

$$\text{Deriv}_{k,l} = \ln(\text{Fract}_{k,l} \cdot 10^4) - \ln(\text{Fract}_{k+1,l} \cdot 10^4), \quad (1)$$

где $\sum_{k=1}^{k=N} \text{Fract}_{k,l} = 1$; $\text{Fract}_{k,l}$ – частоты фрактальных профилей почвенных микроорганизмов, расположенные в ячейках матрицы Fract;

$k = 1, \dots, N - 1$; $l = 1, \dots, M$ – порядковые номера строк и столбцов в матрице Fract;

$N = 6$, $M = 5$ – число физиологических групп во фрактальном профиле микроорганизмов и число вариантов опыта.

II этап. Слой нейронов L1 нормализует цифровые данные матрицы (Deriv, рис. 2) с помощью стандартной функции нормализации числовых данных *Normalization* [35] и записывает результаты нормализации в матрицу FNorm.

$$\text{FNorm} = \text{Normalization}(\text{Deriv}). \quad (1)$$

III этап. Слой нейронов L1 вычисляет корреляционную матрицу $Corr$, используя данные матрицы $FNorm$ и стандартную процедуру *Correlation* [33].

$$Corr = Correlation(FNorm). \quad (2)$$

IV этап. Слой нейронов L1 вычисляет произведение матриц $FNorm \times Corr$, выполняет построчную нормализацию полученных цифровых данных, используя стандартную процедуру *Normalization*, и записывает результаты нормализации в матрицу $CNorm$.

$$CNorm = Normalization(FNorm \times Corr). \quad (3)$$

V этап. Слой нейронов L2 вычисляет матрицы евклидовых дистанций $FDist$ и $CDist$, используя цифровые данные, расположенные в столбцах матриц $FNorm$ и $CNorm$, и стандартную вычислительную процедуру *EuclidDistance()* [34].

$$FDist_{kl} = EuclidDistance(FNorm_{1k}, \dots, FNorm_{Nk}; FNorm_{1l}, \dots, FNorm_{Nl}), \quad (4)$$

$$CDist_{kl} = EuclidDistance(CNorm_{1k}, \dots, CNorm_{Nk}; CNorm_{1l}, \dots, CNorm_{Nl}), \quad (5)$$

где $k, l = 1, \dots, M$ – порядковые номера столбцов в матрицах $FNorm$ и $CNorm$;

$M = N = 5$ – число столбцов и строк в матрицах $FNorm$ и $CNorm$;

EuclidDistance() – стандартная процедура вычисления евклидовых дистанций между столбцами матриц $FNorm$ и $CNorm$.

VI этап. Слой нейронов L2 вычисляет матрицы $FCom$ и $CCom$, используя данные диагональных

симметричных матриц $FDist$, $CDist$ и стандартную процедуру вычисления собственных векторов симметричных матриц *EigenVectors* [35].

$$FCom = EigenVectors(FDist). \quad (6)$$

$$CCom = EigenVectors(CDist). \quad (7)$$

VII этап. Слой нейронов L3 вычисляет значение индекса CSI, используя вычислительные алгоритмы нейросети NONN, представленные в базе алгоритмов Comby. Вычислительные алгоритмы представляют собой алгебраические выражения, в которых в комбинированной форме применялись математические операнды сложения, вычитания, умножения и деления по отношению к данным матриц $FNorm$, $CNorm$, $FDist$, $CDist$, $FCom$, $CCom$.

VIII этап. Слой нейронов L4 в циклах тестирования-обучения Learning нейросети NONN реализует автоматический перебор алгоритмов из базы алгоритмов Comby, вычисление индекса CSI и вычисление коэффициента корреляции и регрессии индексов CSI с данными вектора Yield (урожай растений риса, таблица 1, рис. 2). Выход из цикла Learning был осуществлен при выборе алгоритма Comby130, который обеспечил высокую корреляцию индекса CSI с данными вектора Yield – . Результаты вычислений индексов CSI по вариантам опыта приведены в таблице 1 и на рис. 3.

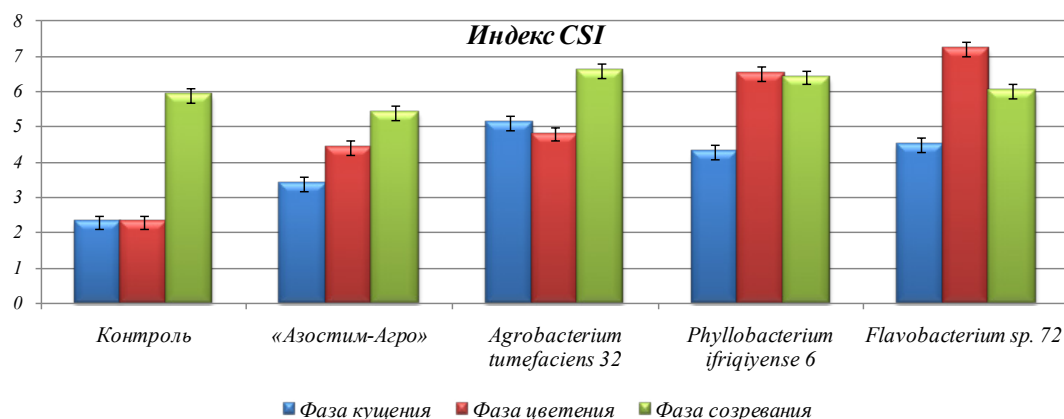


Рис. 3. Значения индекса биоконсолидации CSI микроорганизмов в ризосфере в фазы онтогенеза растений при предпосевной инокуляции семян риса

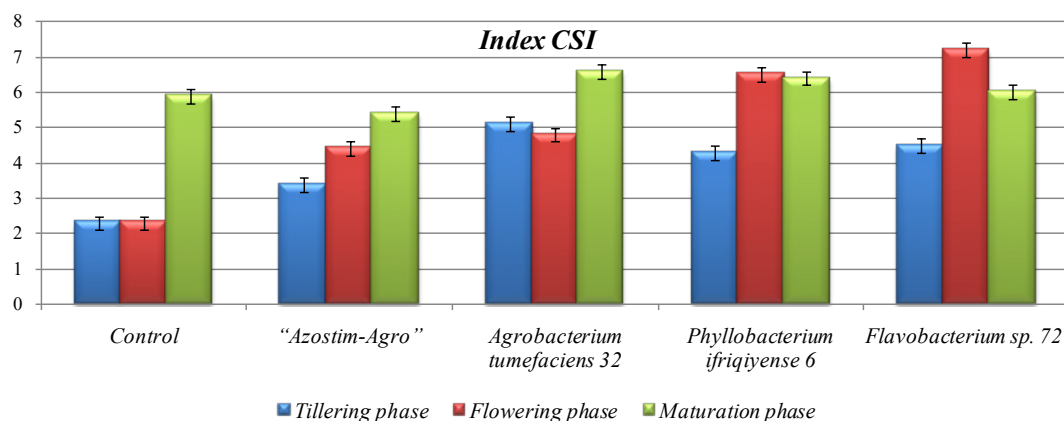


Fig. 3. Values of the bio-consolidation index CSI of microorganisms in the rhizosphere in the phases of plant ontogenesis during pre-sowing inoculation of rice seeds

Новейшая нейросетевая информационная технология, преобразующая фрактальные профили почвенных микроорганизмов в индексы CSI, позволила извлечь скрытую информацию об интенсивности масс-накопительных процессов в растениях на трех стадиях онтогенеза растений риса (кущения, цветения и созревания), анализируя форму фрактальных профилей микроорганизмов.

Анализ полученных данных показал, что инокуляция обеспечивает биоконсолидацию микроорганизмов и их активности (по каталазе) в системе растение *Oriza sativa* L. – микроорганизм в сравнении с контролем, причем этот эффект проявляется в фазы кущения и цветения. Наибольшее значение урожайности растений риса (13,6 т/га) и наибольшее значение индекса биоконсолидации микроорганизмов на стадии кущения (CSI = 5,1) и созревания (CSI = 6,6) растений наблюдается при бактериализации семян риса *A. tumefaciens*. По всей видимости, на стадии кущения закладываются основы продуктивной мейотелки урожая растений, а на стадии созревания урожай уже сформирован. Поэтому биоконсолидация почвенных микроорганизмов при обработке семян риса бактериями *A. tumefaciens* обеспечила наилучшее развитие растений риса на стадиях кущения и созревания, а значит, наибольший урожай растений.

Стоит отметить эффективность инокуляции ассоциативной бактерией *Flavobacterium* sp. 72 в стадию кущения. Однако этого оказалось недостаточно для полноценного развития растений, что отразилось на самой маленькой прибавке урожая риса по отношению к контролю.

Возможно, одновременное использование бактерий *A. tumefaciens* 32 и *Flavobacterium* sp. 72 может повысить эффект предпосевной бактериализации семян риса микробиологическими препаратами на урожай растений.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Таким образом, показано, что инокуляция обеспечивает биоконсолидацию микроорганизмов и их активность в растительно-микробном взаимодействии (*Oriza sativa* L. – микроорганизм). Установлено, что из исследуемых инокулянтов *A. tumefaciens* стимулирует биоконсолидацию почвенной микрофлоры, интенсифицирует масс-накопительные процессы в растениях (на стадиях онтогенеза растений: кущения, цветения и созревания) и повышает урожай риса. Отмечено, что улучшение азотного питания, стимуляция роста и повышение иммунного статуса растений возможны при внедрении такого биологического агроприема, как бактериализация семян риса штаммами микроорганизмов, обладающими высокой степенью ассоциативности с растением. Выявлено, что полифункциональные штаммы ризобактерий увеличивают биологическую продуктивности урожайность риса и ее структурных элементов.

Фрактальный профиль почвенных микроорганизмов ризосферы, составленный из численностей физиологических групп микроорганизмов, оказался дешевле, чем фрактальный профиль микроорганизмов, составленный из численностей таксонов, но нужную нам информацию удалось извлечь. В современных санкционных условиях это имеет значение.

Библиографический список

1. Nikolova R., Petkova M., Dinev N., Kenarova A., Boteva S., Berov D., Radeva G. Correlation between bacterial abundance, soil properties and heavy metal contamination in the area of non-ferrous metal processing plant, Southern Bulgaria // *BioRisk*. 2022. Vol. 17. Pp. 19–30. DOI: 10.3897/biorisk.17.77458.
2. Martínez-Toledo Á., González-Mille D. J., García-Arreola M. E., Cruz-Santiago O., Trejo-Acevedo A., Ilizaliturri-Hernández C. A. Patterns in utilization of carbon sources in soil microbial communities contaminated with mine solid wastes from San Luis Potosi, Mexico // *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021. Vol. 208. Article number 111493. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.111493.
3. Venturini A. M., Gontijo J. B., Mandro J. A., Peay K. G., Tsai S. M., Bohannan B. J. M. Soil microbes under threat in the Amazon Rainforest // *Trends in Ecology & Evolution*. 2023. Vol. 38, No. 8. Pp. 693–696. DOI: 10.1016/j.tree.2023.04.014.
4. Das K., Das S. C., Aminuzzaman F. M. Environmental and Ecological Impact of Soil Microorganisms in Plant Sciences // *Journal of Ecology and Natural Resources*. 2022. Vol. 6 (2). Article number 000273. DOI: 10.23880/jenr-16000273.
5. Шапошников А. И., Белимов А. А., Азарова Т. С., Струнникова О. К., Вишневская Н. А., Воробьев Н. И., Юзихин О. С., Беспалова Л. А., Тихонович И. А. Взаимосвязь состава корневых экссудатов и эффективности взаимодействия растений пшеницы с микроорганизмами // *Прикладная биохимия и микробиология*. 2023. Т. 59, № 3. С. 260–274. DOI: 10.31857/S0555109923030170.
6. Проворов Н. А., Тихонович И. А. Сельскохозяйственная микробиология и симбиогенетика: синтез классических идей и конструирование высокопродуктивных агроценозов (обзор) // *Сельскохозяйственная биология*. 2022. Т. 57, № 5. С. 821–831. DOI: 10.15389/agrobiol.2022.5.821rus.
7. Чайковская Л. А., Овсиенко О. Л. Фосфатмобилизующие микроорганизмы: биоразнообразие, влияние на минеральное питание растений и их продуктивность // *Таврический вестник аграрной науки*. 2021. № 4 (28). С. 159–182. DOI: 10.33952/2542-0720-2021-4-28-159-182.

8. Абдурашитова Э. Р., Мельничук Т. Н., Абдурашитов С. Ф. Оценка биологической активности ризосферы *Sorghum bicolor* (L.) Moench под влиянием микробных препаратов в условиях прямого посева в степной зоне крима // Экосистемы. 2021. № 26. С. 116–123. DOI: 10.37279/2414-4738-2021-26-116-123.
9. Abdurashytova E. R., Melnichuk T. N., Abdurashytov S. F., Egovtseva A. Yu., Turin E. N., Gongalo A. A. Adaptability of the *Sorghum bicolor* rhizosphere microbiocenosis inoculated by microbial agents in southern chernozem soils // Russian Agricultural Sciences. 2022. Vol. 48, No. 3. Pp. 212–218. DOI: 10.3103/s1068367422030028.
10. Adomako M. O., Roiloa S., Yu F. H. Potential roles of soil microorganisms in regulating the effect of soil nutrient heterogeneity on plant performance // Microorganisms. 2022. Vol. 10, No. 12. Article number 2399. DOI: 10.3390/microorganisms10122399.
11. Гуторова О. А., Шеуджен А. Х. Современное состояние плодородия почв рисовых агроландшафтов Кубани // Известия ОГАУ. 2018. № 5 (73). С. 80–84.
12. Мельничук Т. Н., Якубовская А. И., Каменева И. А., Дидович С. В., Паштецкий В. С. Ассоциативные микроорганизмы растений: выделение штаммов и их изучение. Симферополь: ООО «Ариал», 2021. 179 с. DOI: 10.33952/2542-0720-2022-978-5-907506-71-8.
13. Воробьев Н. И., Егоров И. А., Кочиш И. И., Никонов И. Н., Ленкова Т. Н. Биосистемная самоорганизация и фрактальная структура частотно-таксономических профилей микробиоты кишечника бройлеров под влиянием кормовых пробиотиков // Сельскохозяйственная биология. 2021. Т. 56, № 2. С. 400–410. DOI: 10.15389/agrobiology.2021.2.400rus.
14. Кочиш И. И., Воробьев Н. И., Никонов И. Н., Селина М. В. Нейросетевое моделирование фрактальной самоорганизации микробно-организменных биосистем в кишечниках птиц // Ветеринария и Зоотехния. 2022. № 12. С. 57–65. DOI: 10.36871/vet.zoo.bio.202212208.
15. Зенова Г. М., Степанов А. Л., Лихачева А. А., Манучарова Н. А. Практикум по биологии почв: учебное пособие. Москва: Издательство МГУ, 2002. 120 с.
16. Козлов А. В. Методы почвенной микробиологии и энзимологии в экосистемных исследованиях: учебно-методическое пособие для вузов. Москва: Плодородие, 2023. 152 с.
17. Семенов М. В. Метабаркодинг и метагеномика в почвенно-экологических исследованиях: успехи, проблемы и возможности // Журнал общей биологии. 2019. Т. 80, № 6. С. 403–417. DOI: 10.1134/S004445961906006X.
18. Орлова О. В., Чирак Е. Л., Воробьев Н. И., Свиридова О. В., Лисина Т. О., Андронов Е. Е. Таксономический состав и организация микробного сообщества дернов-подзолистых почв после внесения соломы зерновых культур и использования препарата Баркон // Сельскохозяйственная биология. 2019. Т. 54, № 1. С. 47–64. DOI: 10.15389/agrobiology.2019.1.47rus.
19. Sutrop U. List task and a Cognitive Salience Index // Field Methods. 2001. Vol. 13 (3). Pp. 263–276. DOI: 10.1177/1525822X0101300303.
20. Загоруйко Н. Г. Когнитивный анализ данных. Новосибирск: Академическое издательство ГЕО, 2013. 183 с.
21. Заикина А. С., Буряков Н. П., Воробьев Н. И., Никонов И. Н. Нейросетевой анализ соответствия микробно-организменной биосистемы кишечника бройлеров фрактально-стохастической модели // Пермский аграрный вестник. 2022. № 4 (40). С. 98–106. DOI: 10.47737/2307-2873_2022_40_9.
22. Гафаров Ф. М., Галимянов А. Ф. Искусственные нейронные сети и приложения: учебное пособие. Казань: Издательство Казанского университета, 2018. 121 с.
23. Крутлов В. В., Борисов В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. Москва: Горячая линия Телком, 2002. 382 с.
24. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: an overview // Neural Networks. 2015. Vol. 61. Pp. 85–117. DOI: 10.1016/j.neunet.2014.09.003.
25. Погодаев А. К., Хабибуллина Е. Л., Инютин Д. М. Применение нейросетевых моделей для построения продукционных правил экспертных систем // Прикладная математика и вопросы управления. 2021. № 2. С. 73–92. DOI: 10.15593/2499-9873/2021.2.05.
26. Кулаков К. А., Димитров В. М. Основы тестирования программного обеспечения. Петрозаводск: Издательство ПетрГУ, 2018. 57 с.
27. Widrow B., Aaron G., Youngsik K., Dookun P. The no-prop algorithm: A new learning algorithm for multilayer neural networks // Neural Networks. 2013. Vol. 37. Pp. 182–188. DOI: 10.1016/j.neunet.2012.09.020. Scopus
28. Якубовская А. И., Каменева И. А., Гритчин М. В., Мельничук Т. Н. Эффективность интродукции ассоциативных бактерий в ризосферу риса (*Oryza sativa* L.) // Таврический вестник аграрной науки. 2019. № 2 (18). С. 110–116. DOI: 10.33952/2542-0720-2019-2-18-110-116.

29. Доспехов Б. А. Методика полевого опыта. Москва: Альянс, 2015. 315 с.
30. Шарифуллин Р. С., Шарифуллина Ю. Б. Способ расчета биологической урожайности риса // Рисоводство. 2020. № 3 (48). С. 25–29. DOI: 10.33775/1684-2464-2020-48-3-25-29.
31. Mascarenhas W. F. Fast and accurate normalization of vectors and quaternions // Computational and Applied Mathematics. 2018. Vol. 37. Pp. 4649–4660.
32. Song J., Shi Z., Wang H. The fast attitude estimation method based on quaternion and generalized multivectors // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2020. Vol. 70. DOI: 10.1109/TIM.2020.3018838.
33. Nikolić D., Muresan R., Feng W., Singer W. Scaled correlation analysis: a better way to compute a cross-correlogram // European Journal of Neuroscience. 2012. Vol. 35 (5). DOI: 10.1111/j.1460-9568.2011.07987.x.
34. Everitt B. S., Landau S., Leese M., Stahl D. Cluster Analysis. John Wiley & Sons. UK: West Sussex, 2011. 352 p.
35. Маркова Л. В., Корчевская Е. А. Численные методы нахождения собственных векторов и собственных значений матриц. Витебск: УО «ВГУ им. П. М. Машерова», 2011. 47 с.

Об авторах:

Алла Ивановна Якубовская, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, Симферополь, Россия; ORCID 0000-0001-8434-2689, AuthorID 9872-5122. E-mail: yakubovskaya_alla@mail.ru

Ян Викторович Пухальский, научный сотрудник, Ленинградский государственный университет имени А. С. Пушкина, Санкт-Петербург, Пушкин, Россия; ORCID 0000-0001-5233-3497, AuthorID 784249. E-mail: puhalskyan@gmail.com

Николай Иванович Воробьев, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Всероссийский НИИ сельскохозяйственной микробиологии, Санкт-Петербург, Пушкин, Россия; ORCID 0000-0001-8300-2287, AuthorID 86787. E-mail: nik.ivanvorobyov@yandex.ru

Ирина Алексеевна Каменева, кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, Симферополь, Россия; ORCID 0000-0003-3914-7184, AuthorID 904450. E-mail: irina.kameneva.7@yandex.ru

Максим Владимирович Гритчин, научный сотрудник, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, Симферополь, Россия; ORCID 0000-0002-9680-493X, AuthorID 3516-6060. E-mail: maxim_gmv@mail.ru

Анна Юрьевна Еговцева, научный сотрудник, Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма, Симферополь, Россия; ORCID 0000-0002-3638-0194, AuthorID 925336. E-mail: eau82@mail.ru

References

1. Nikolova R., Petkova M., Dinev N., Kenarova A., Boteva S., Berov D., Radeva G. Correlation between bacterial abundance, soil properties and heavy metal contamination in the area of non-ferrous metal processing plant, Southern Bulgaria. *BioRisk*. 2022; 17: 19–30. DOI: 10.3897/biorisk.17.77458.
2. Martínez-Toledo Á., González-Mille D. J., García-Arreola M. E., Cruz-Santiago O., Trejo-Acevedo A., Ilizaliturri-Hernández C. A. Patterns in utilization of carbon sources in soil microbial communities contaminated with mine solid wastes from San Luis Potosi, Mexico. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2021; 208: 111493. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2020.111493.
3. Venturini A. M., Gontijo J. B., Mandro J. A., Peay K. G., Tsai S. M., Bohannon B. J. M. Soil microbes under threat in the Amazon Rainforest. *Trends in Ecology & Evolution*. 2023; 38 (8): 693–696. DOI: 10.1016/j.tree.2023.04.014.
4. Das K., Das S. C., Aminuzzaman F. M. Environmental and Ecological Impact of Soil Microorganisms in Plant Sciences. *Journal of Ecology and Natural Resources*. 2022; 6 (2): 000273. DOI: 10.23880/jenr-16000273.
5. Shaposhnikov A. I., Belimov A. A., Azarova T. S., Strunnikova O. K., Vishnevskaya N. A., Vorobyov N. I., Yuzikhin O. S., Bupalova L. A., Tikhonovich I. A. Relationship between the composition of root exudates and the efficiency of interaction of wheat plants with microorganisms. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2023; 59 (3): 260–274. DOI: 10.31857/S0555109923030170. (In Russ.)
6. Provorov N. A., Tikhonovich I. A. Agricultural microbiology and symbiogenetics: synthesis of classical ideas and construction of highly productive agrocenoses (review). *Agricultural Biology*. 2022; 57 (5): 821–831. DOI: 10.15389/agrobiology.2022.5.821rus. (In Russ.)
7. Chaykovskaya L. A., Ovsienko O. L. Phosphate-mobilizing microorganisms: biodiversity, influence on plants mineral nutrition and productivity. *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2021; 4 (28): 159–182. DOI: 10.33952/2542-0720-2021-4-28-159-182. (In Russ.)

8. Abdurashitova E. R., Melnichuk T. N., Abdurashitov S. F. Evaluation of the biological activity of the rhizosphere *Sorghum bicolor* under the influence of microbial preparations using no-till technology in the Crimean Steppe. *Ekosistemy*. 2021; 26: 116–123. DOI: 10.37279/2414-4738-2021-26-116-123. (In Russ.)
9. Abdurashytova E. R., Melnichuk T. N., Abdurashytov S. F., Egovtseva A. Yu., Turin E. N., Gongalo A. A. Adaptability of the *Sorghum bicolor* rhizosphere microbiocenosis inoculated by microbial agents in southern chernozem soils. *Russian Agricultural Sciences*. 2022; 48 (3): 212–218. DOI: 10.3103/s1068367422030028. (In Russ.)
10. Adomako M. O., Roiloa S., Yu F. H. Potential roles of soil microorganisms in regulating the effect of soil nutrient heterogeneity on plant performance. *Microorganisms*. 2022; 10 (12): 2399. DOI: 10.3390/microorganisms10122399.
11. Gutorova O. A., Sheudzhen A. Kh. Current state of soil fertility of rice agrolandscapes of Kuban. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2018; 5 (73): 80–84. (In Russ.)
12. Melnichuk T. N., Yakubovskaya A. I., Kameneva I. A., Didovich S. V., Pashtetskiy V. S. *Associative plant microorganisms: isolation of strains and their study*. Simferopol: Arial, 2021. 179 p. DOI: 10.33952/2542-0720-2022-978-5-907506-71-8. (In Russ.)
13. Vorobyov N. I., Egorov I. A., Kochish I. I., Nikonov I. N., Lenkova T. N. Fractal analysis of frequency-taxonomic profile of broiler's gut microbiota for studying the influence of probiotics on bird development. *Agricultural Biology*. 2021; 56 (2): 400–410. DOI: 10.15389/agrobiol.2021.2.400rus. (In Russ.)
14. Kochish I. I., Vorobyov N. I., Nikonov I. N., Selina M. V. Neural network modeling of fractal self-organization of microbial-organismal biosystems in the intestines of birds. *Veterinary and Animal Science*. 2022; 12: 57–65. DOI: 10.36871/vet.zoo.bio.202212208. (In Russ.)
15. Zenova G. M., Stepanov A. L., Likhacheva A. A., Manucharova N. A. *Practical training in soil biology: a textbook*. Moscow: Moscow State University Publishing House, 2002. 120 p. (In Russ.)
16. Kozlov A. V. *Methods of soil microbiology and enzymology in ecosystem studies: a teaching aid for universities*. Moscow: Plodorodie, 2023. 152 p. (In Russ.)
17. Semenov M. V. Metabarcoding and metagenomics in soil ecology research: Achievements, challenges, and opportunities. *Biology Bulletin Reviews*. 2019; 80 (6): 403–417. DOI: 10.1134/S004445961906006X. (In Russ.)
18. Orlova O. V., Chirak E. L., Vorobyov N. I., Sviridova O. V., Lisina T. O., Andronov E. E. Taxonomic composition and organization of the microbial community of sod-podzolic soils after the introduction of cereal straw and the use of the Barkon preparation. *Agricultural Biology [Sel'skokhozyaistvennaya biologiya]*. 2019; 54(1): 47–64. DOI: 10.15389/agrobiol.2019.1.47rus. (In Russ.)
19. Sutrop U. List task and a Cognitive Salience Index. *Field Methods*. 2001; 13(3): 263–276. DOI:10.1177/1525822X0101300303.
20. Zagoruyko N. G. *Cognitive data analysis*. Novosibirsk: Academic publishing house GEO, 2013. 183 p. (In Russ.)
21. Zaikina A. S., Buryakov N. P., Vorobyov N. I., Nikonov I. N. Neural network analysis of the compliance of the microbial-organismic biosystem of poultry intestines with a fractal-stochastic model. *Perm Agrarian Journal*. 2022; 4 (40): 98–106. DOI: 10.47737/2307-2873_2022_40_98. (In Russ.)
22. Gafarov F. M., Galimyanov A. F. *Artificial neural networks and applications: textbook. allowance*. Kazan: Publishing house of Kazan University, 2018. 121 p.
23. Kruglov V. V., Borisov V. V. *Artificial neural networks. Theory and practice*. Moscow: Hot line-Telekom, 2002. 382 p. (In Russ.)
24. Schmidhuber J. Deep learning in neural networks: an overview. *Neural Networks*. 2015; 61: 85–117. DOI: 10.1016/j.neunet.2014.09.003.
25. Pogodaev A. K., Khabibullina E. L., Inyutin D. M. Application of neural network models for constructing production rules of expert systems. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2021; 2: 73–92. DOI: 10.15593/2499-9873/2021.2.05. (In Russ.)
26. Kulakov K. A., Dimitrov V. M. *Fundamentals of software testing*. Petrozavodsk: PetrSU Publishing House, 2018. 57 p. (In Russ.)
27. Widrow B., Aaron G., Youngsik K., Dookun P. The no-prop algorithm: A new learning algorithm for multilayer neural networks. *Neural Networks*. 2013; 37: 182–188. DOI: 10.1016/j.neunet.2012.09.020.
28. Yakubovskaya A. I., Kameneva I. A., Gritchin M. V., Melnichuk T. N. Efficiency of the introduction of associative bacteria in rice rhizosphere (*Oryza sativa* L.). *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2019; 2 (18): 110–116. DOI: 10.33952/2542-0720-2019-2-18-110-116. (In Russ.)
29. Dospekhov B. A. *Methodology of field experiment*. Moscow, 2011. 315 p. (In Russ.)
30. Sharifullin R. S., Sharifullina Yu. B. Method for calculating the biological yield of rice. *Rice Growing*. 2020; 3 (48): 25–29. DOI: 10.33775/1684-2464-2020-48-3-25-29. (In Russ.)

31. Mascarenhas W. F. Fast and accurate normalization of vectors and quaternions. *Computational and Applied Mathematics*. 2018; 37: 4649–4660.
32. Song J., Shi Z., Wang H. The fast attitude estimation method based on quaternion and generalized multivector. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020; 70. DOI: 10.1109/TIM.2020.3018838.
33. Nikolić D., Muresan R., Feng W., Singer W. Scaled correlation analysis: a better way to compute a cross-correlogram. *European Journal of Neuroscience*. 2012; 35 (5): DOI: 10.1111/j.1460-9568.2011.07987.x.
34. Everitt B. S., Landau S., Leese M., Stahl D. *Cluster Analysis*. West Sussex: John Wiley & Sons, 2011. 352 p.
35. Markova L. V., Korchevskaya E. A. *Numerical methods for finding eigenvectors and eigenvalues of matrices*. Vitebsk: UO “VSU named after P. M. Masherov”, 2011. 47 p. (In Russ.)

Authors' information:

Alla I. Yakubovskaya, candidate of biological science, senior researcher, Scientific Research Institute of Agriculture of Crimea, Simferopol, Russia; ORCID 0000-0001-8434-2689, AuthorID 9872-5122.
E-mail: yakubovskaya_alla@mail.ru

Yan V. Pukhalskiy, researcher, Pushkin Leningrad State University, Saint Petersburg, Pushkin, Russia; ORCID 0000-0001-5233-3497, AuthorID 784249. *E-mail: puhalskyan@gmail.com*

Nikolay I. Vorobyev, candidate of technical sciences, leading researcher, All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology, Saint Petersburg, Pushkin, Russia; ORCID 0000-0001-8300-2287, AuthorID 86787. *E-mail: nik.ivanvorobyov@yandex.ru*

Irina A. Kameneva, candidate of agricultural sciences, leading researcher, Scientific Research Institute of Agriculture of Crimea, Simferopol, Russia; ORCID 0000-0003-3914-7184, AuthorID 904450.
E-mail: irina.kameneva.7@yandex.ru

Maksim V. Gritchkin, researcher, Research Institute of Agriculture of Crimea, Simferopol, Russia; ORCID 0000-0002-9680-493X, AuthorID 3516-6060. *E-mail: maxim_gmv@mail.ru*

Anna Yu. Egovtseva, researcher, Research Institute of Agriculture of Crimea, Simferopol, Russia; ORCID 0000-0002-3638-0194, AuthorID 925336. *E-mail: eau82@mail.ru*