

**Агрочоведение и агроэкология**

УДК 631.84+633.11

DOI 10.31857/S2500262724050052 EDN SIXPRS

**ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ АГРОЭКОСИСТЕМЫ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ  $^{15}\text{N}$  И ИНОКУЛЯЦИИ СЕМЯН БИОПРЕПАРАТАМИ**© 2024 г. **А. А. Завалин**, академик РАН, **Дж. Ньямбосе**, кандидат биологических наук, **Л. С. Чернова**, кандидат сельскохозяйственных наук*Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии имени Д. Н. Прянишникова  
127434, Москва, ул. Прянишникова, 31а  
E-mail: zavalin.52@mail.ru*

*Исследование проводили с целью изучения влияния различных доз азотного удобрения и биопрепаратов на функционирование агроэкосистемы яровой пшеницы на темно-серой лесной почве. Работу выполняли в двух закладках микрополевого опыта в 2020–2021 гг., схема которого предполагала изучение следующих вариантов:  $N_{45}P_{45}K_{45}$  (фон), фон + Экстрасол на основе штамма Ч-13 (стандарт), фон + эндофитный штамм V 167, фон + эндофитный штамм 417,  $N_{90}P_{45}K_{45}$ . Биопрепараты на основе исследуемых микроорганизмов применяли путем инокуляции семян яровой пшеницы в день посева. При внесении  $N_{45}$  и  $N_{90}$  на фоне РК растения потребляют соответственно от 46 и 42 % меченого удобрения для формирования урожая. Применение биопрепаратов на фоне  $N_{45}$  повышает использование N-удобрения до 51...53 %. В почве закрепляется 33...36 % от внесенной дозы  $^{15}\text{N}$ , при инокуляции биопрепаратами величина этого показателя снижается до 30 %. При внесении аммиачной селитры теряется 33...36 %  $^{15}\text{N}$ , инокуляция семян биопрепаратами сокращает потери до 16...18 %. Использование биопрепаратов приводит к тому, что после уборки яровой пшеницы в почве остается на 0,47...0,51 г/м<sup>2</sup> минерального азота меньше, что свидетельствует о лучшем его использовании растениями. По отношению реимобилизованного азота к мобилизованному (РИ:  $M = 25...31$  %) агроценоз яровой пшеницы при внесении азотного удобрения и инокуляции семян биопрепаратами функционирует в режиме резистентности, а уровень воздействия характеризуется как предельно допустимый. По критерию нормирования, который оценивается по отношению нетто-минерализованного азота к реимобилизованному (Н-М:  $M = 2,24...2,98$ ), агроценоз яровой пшеницы находится в режиме стресса или резистентности. Применение эндофитного биопрепарата на основе штамма V 417 приводит к тому, что агроценоз яровой пшеницы функционирует в режиме резистентности при допустимом уровне воздействия.*

**ASSESSMENT OF THE STABILITY OF SPRING WHEAT AGROCENOSIS WITH APPLICATION OF  $^{15}\text{N}$  AND SEED INOCULATION WITH BIOLOGICS****A. A. Zavalin, J. Nyambose, L. S. Chernova***Pryanishnikov All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry,  
127550, Moskva, ul. Pryanishnikova, 31 a,  
E-mail: zavalin.52@mail.ru*

*The purpose of the research is to study the effect of various doses of nitrogen fertilizers and biological products on the functioning of the agroecosystem of spring wheat on dark gray forest soil. The work was performed in two tabs of the micropole experiment in 2020–2021, the scheme of which assumed the study of the following options:  $N_{45}P_{45}K_{45}$  (background), background + Extrasol based on strain H-13 (standard), background + endophytic strain V 167, background + endophytic strain 417,  $N_{90}P_{45}K_{45}$ . When applying  $N_{45}$  and  $N_{90}$  against the background of PK, plants consume 46 and 42 % of labeled fertilizer to form a crop, respectively. When using biologics against the background of  $N_{45}$ , the use of N-fertilizer reaches 51...53 %. 33...36 % of the applied dose of  $^{15}\text{N}$  is fixed in the soil, when using biologics, the value of this indicator decreases to 30 %. When adding ammonium nitrate, 33...36 % of  $^{15}\text{N}$  is lost, and when using biological products, losses are reduced to 16...18 %. The use of biological preparations for seed inoculation leads to the fact that after harvesting spring wheat, there is less mineral nitrogen in the soil by 0.47...0.51 g/m<sup>2</sup>, which indicates its best use by plants. According to the criterion of the ratio of reimmobilized nitrogen to mobilized nitrogen (RI:  $M = 25...31$  %) the agroecosystem of spring wheat, when applying nitrogen fertilizer and inoculating seeds with biologics, functions in resistance mode and the level of exposure is estimated as the maximum permissible. According to the rationing criterion, which is estimated in relation to the ratio of net mineralized nitrogen to reimmobilized (NM:  $M = 2.24...2.98$ ), the agroecosystem of spring wheat is in stress or resistance mode. The use of an endophytic biopreparation based on the V 417 strain leads to the fact that the agroecosystem of spring wheat functions in resistance mode at the maximum permissible level of exposure.*

**Ключевые слова:** изотоп азота, азотное удобрение, биопрепараты, использование азота, яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.), устойчивость агроэкосистемы.

**Keywords:** nitrogen isotope, nitrogen fertilizer, biological products, nitrogen use, spring wheat (*Triticum aestivum* L.), agroecosystem stability.

Для формирования урожая и регулирования качества производимого зерна яровой пшеницы необходимо внесение азотных минеральных удобрений [1, 2]. Для оптимизации питания растений азотом и улучшения окружающей среды можно использовать специальные препараты, созданные на основе разных штаммов активных бактерий [3, 4], среди которых особую нишу

занимают эндофитные микроорганизмы [5]. Применение биопрепаратов на их основе в результате фиксации азота атмосферы улучшает обеспеченность растений этим элементом, повышает использование почвенных запасов азота, фосфора и калия, увеличивает потребление элементов питания из вносимых минеральных удобрений, микроорганизмы, входящие в состав биопрепаратов,

могут контролировать распространение патогенных микроорганизмов [3, 5]. Препараты, созданные на основе активных штаммов микроорганизмов, применяемые при выращивании различных полевых сельскохозяйственных культур, повышают устойчивость агроэкосистемы к изменяющимся внешним условиям [5, 6].

Эффективность использования растениями азотных удобрений при комплексном применении их с другими средствами химизации и биологизации в агротехнологиях яровой пшеницы может быть оценена по потокам азота в системе почва и растения, включая размеры накопления этого элемента в растениях, или коэффициент использования, закрепление азота в почве, потери (преимущественно газообразные) [7, 8, 9]. В исследованиях со стабильным изотопом  $^{15}\text{N}$  доказано, что коэффициент использования азота растениями яровой пшеницы на большинстве типов почв России изменяется от 40 до 45 % от вносимой дозы, 30...40 % его закрепляется в почве и до 20...25 % составляют потери [8, 9]. В последние годы получил развитие новый подход к оценке режимов функционирования агроэкосистем, где их исследуют как функциональные модели взаимодействующих компонентов (почва–микроорганизмы–растения–атмосфера), интегрированные потоками азота [10, 11].

Цель исследования – определить устойчивость агроэкосистемы на фоне применения удобрений и биопрепаратов при возделывании яровой пшеницы на темно-серой лесной почве с использованием критериев интегральной оценки ее режимов функционирования и уровней воздействия.

**Методика.** Работу выполняли в двух закладках микрополевого опыта на темно-серой лесной почве в 2020–2021 гг. Схема эксперимента предполагала изучение следующих вариантов:  $\text{N}_{45} \text{P}_{45} \text{K}_{45}$  (фон), фон + Экстрасол на основе штамма Ч-13 (стандарт), фон + эндофитный штамм V 167, фон + эндофитный штамм 417,  $\text{N}_{90} \text{P}_{45} \text{K}_{45}$ .

Методика закладки и проведения опыта, характеристика удобрений и микробных препаратов, вносимого азотного удобрения, погодные условия в период вегетации яровой пшеницы, методы выполнения анализов почвы и растений, а также статистической обработки результатов были изложены ранее [7]. В опыте высевали среднеспелый сорт Злата яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.). Темно-серая лесная почва перед закладкой опыта характеризовалась следующими агрохимическими показателями: содержание гумуса (по Тюрину) – 2,9...3,0 %; подвижных форм  $\text{P}_2\text{O}_5$  и  $\text{K}_2\text{O}$  (по Кирсанову) – соответственно 120...132 и 131...140 мг/кг;  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  – 5,9...6,2; Нг (по Каппену) – 1,12...1,24 мг-экв/100 г.

Оценку потоков азота в агроэкосистеме проводили по данным, полученным с применением стабильного изотопа азота  $^{15}\text{N}$ , этот метод обеспечивает получение достоверных сведений по потреблению растениями, закреплению в почве и учету потерь азота, в основном в газообразной форме [8, 9]. Кроме того, необходимо знать, сколько минерального азота ( $\text{N-NO}_3 + \text{N-NH}_4$ ) содержится в слое почвы глубиной 0...20 см или пахотном слое после уборки исследуемой культуры.

В качестве азотного удобрения вносили аммиачную селитру в дозах 45 и 90 кг д.в./га, или 4,5 и 9,0 г/м<sup>2</sup>. Для изучения использования растениями азота удобрения применяли меченую ( $^{15}\text{N}$ ) аммиачную селитру ( $^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$ ) с обогащением 47,5 ат. %. Оптимизацию фосфорно-калийного питания растений обеспечивали внесением двойного суперфосфата и хлористого калия в дозах по 45 кг/га действующего вещества. Определяли

эффективность действия двух новых биопрепаратов: первый создан на основе штамма эндофитных бактерий *Bacillus subtilis* V 417, который обладает выраженной фунгицидной активностью против спектра фитопатогенных грибов родов *Fusarium* и *Alternaria*; бактерицидной активностью против фитопатогенных бактерий *Clavibacter michiganensis* subsp. *sepedonicus*, *Erwinia carotovora* subsp. *atroseptica*, *Pseudomonas syringae*, ростстимулирующим эффектом по отношению к яровой пшенице. Второй биопрепарат создан на основе штамма эндофитной бактерии *Bacillus amyloliquefaciens* V 167, который обладает фунгицидной активностью против фитопатогенных грибов *Alternaria alternata*, *Fusarium culmorum*, *Fusarium graminearum*, *Fusarium sporotrichioides* и фитостимулирующим эффектом по отношению к яровой пшенице. В качестве стандарта использовали препарат Экстрасол, созданный на основе штамма *Bacillus subtilis* Ч-13, который характеризуется высокой конкурентоспособностью по отношению к другим почвенным микроорганизмам, синтезирует ростовые вещества, улучшает развитие корневых волосков и увеличивает их поглотительную способность. Микроорганизмы, на основе которых созданы все изучаемые препараты, способны фиксировать атмосферный азот. Инокуляцию семян яровой пшеницы проводили в день посева из расчета 600 г на гектарную норму высева. В растительных и почвенных образцах  $\text{N}_{\text{общ}}$  определяли с использованием элементного анализатора методом сухого озоления по Дюма, изотопный состав азота – на масс-спектрометре Delta V Advantage.

Режим функционирования агроэкосистемы при возделывании яровой пшеницы в вариантах с азотным удобрением, меченым стабильным изотопом  $^{15}\text{N}$ , и инокуляцией семян микробными препаратами оценивали по [10, 11]. Суть метода заключается в определении потоков азота в агроэкосистеме с использованием данных о накоплении этого элемента в растениях в процессе жизнедеятельности, остаточном количестве его минеральных форм в почве, способности растений к повторному использованию азота. Интегральную оценку режимов функционирования агроэкосистемы давали на основе соотношений нетто-минерализованного азота (Н-М) к (ре)иммобилизованному (РИ), выражаемому в условных единицах, а также величины рециркуляции азота во внутрипочвенном цикле (отношение РИ к минерализовавшемуся за вегетацию яровой пшеницы почвенному азоту (М), %).

**Результаты и обсуждение.** В результате обработки семян яровой пшеницы исследуемыми микробными препаратами в ее биомассе (зерне и побочной продукции) накапливается до 20 % биологического азота [7]. При этом наиболее эффективным оказался препарат на основе эндофитного штамма V 417, при использовании которого величина этого показателя была равна 25 %. Внесение азотных минеральных удобрений под яровую пшеницу на темно-серой лесной почве, как и в других типах почв, стимулирует минерализацию почвенного азота и образование дополнительного «экстра»-азота [8]. При использовании микробных биопрепаратов содержание дополнительного азота в биомассе яровой пшеницы находилось на уровне 8,5 %, тогда как при внесении аммиачной селитры величина этого показателя достигала 11,5...12,1 %. Эффективность применения минеральных азотных удобрений характеризует коэффициент использования азота растениями, который по дозам  $\text{N}_{45}$  и  $\text{N}_{90}$  на фоне РК-удобрений составлял соответственно 46 % и 42 %. В варианте с азотным удобрением в количестве  $\text{N}_{45}$  и обработкой семян яровой пшеницы биопрепарата-

**Использование <sup>15</sup>N растениями и параметры функционирования агроэкосистемы при возделывании яровой пшеницы (среднее за 2020–2021 гг.)**

| Показатель  | Вариант  |   |                                    |                                    |   |
|---|--|---|------------------------------------|------------------------------------|---|
|   | N <sub>45</sub> P <sub>45</sub> K <sub>45</sub><br>(фон – Ф) | Ф + Экстра-<br>сол на основе<br>штамма<br>Ч-13 (стандарт) | Ф + эндофит-<br>ный штамм<br>V 167 | Ф + эндофит-<br>ный штамм<br>V 417 | N <sub>90</sub> P <sub>45</sub> K <sub>45</sub> |
| Доза внесения <sup>15</sup> N, г/м <sup>2</sup>                             | 4,5  | 4,5   | 4,5                                | 4,5                                | 9,0   |
| Накопление общего азота в урожае, г/м <sup>2</sup> (НСР <sub>05</sub> 0,80) | 13,63±1,02   | 15,01±1,09  | 15,42±1,27                         | 15,17±0,90                         | 15,72±0,88                                      |
| Вынос <sup>15</sup> N урожаем, г/м <sup>2</sup>                             | 2,06±0,02  | 2,29±0,05   | 2,40±0,03                          | 2,34±0,02                          | 3,77±0,05                                       |
| Закрепление <sup>15</sup> N в 0...20 см слое почвы, г/м <sup>2</sup>        | 1,45±0,02  | 1,45±0,05   | 1,39±0,03                          | 1,31±0,03                          | 3,12±0,01                                       |
| Потери <sup>15</sup> N удобрения, г/м <sup>2</sup>                          | 0,99±0,01  | 0,76±0,01   | 0,72±0,01                          | 0,85±0,02                          | 2,16±1,02                                       |
| Остаточный минеральный азот в почве после учета урожая, г/м <sup>2</sup>    | 1,77±0,35  | 1,30±0,21   | 1,39±0,20                          | 1,34±0,10                          | 1,81±0,33                                       |
| Вынос яровой пшеницей азота из почвы, г/м <sup>2</sup>                      | 11,57  | 12,72   | 13,02                              | 12,83                              | 11,95   |
| Иммобилизация (И) N, г/м <sup>2</sup>                                       | 8,14   | 8,05  | 7,54                               | 7,18                               | 9,89  |
| Газообразные потери, г/м <sup>2</sup>                                       | 9,61   | 4,02  | 3,50                               | 7,26                               | 11,25   |
| Минерализация (М), г/м <sup>2</sup>   | 31,10  | 26,09   | 25,45                              | 28,62                              | 34,90   |
| Нетто-минерализация (Н-М), г/м <sup>2</sup>                                 | 22,95  | 18,04   | 17,91                              | 21,43                              | 25,01   |
| Реиммобилизация (РИ), г/м <sup>2</sup>                                      | 5,14   | 8,05  | 7,54                               | 7,18                               | 9,89  |
| Критерии нормирования РИ:М, %   | 26   | 31  | 30                                 | 25                                 | 28  |
| Н-М:РИ, ед.   | 2,82   | 2,24  | 2,38                               | 2,98                               | 2,53  |

ми коэффициент усвоения изотопа <sup>15</sup>N изменялся в диапазоне от 51 % до 53 % от внесенной дозы.

При использовании меченого <sup>15</sup>N азотного удобрения в почве аккумулировалось от 33 % до 36 % от внесенного количества, а если семена яровой пшеницы обрабатывали специальным препаратом, в почве оставалось только 30 % удобрения, потому что растения использовали больше азота на формирование биомассы.

Потери азота в опыте составили 33...36 % от внесённой дозы. При выращивании яровой пшеницы с использованием семян, инокулированных изучаемыми биопрепаратами, они снижались в 2 раза – до 13...18 %. Максимальное в опыте поглощение яровой пшеницей азота из удобрения (42 %) отмечено в варианте с дозой N<sub>90</sub>, его фиксация в почве при этом была равна 36 %, потери – 23 % от внесённого количества.

Накопление общего азота в зерне и соломе яровой пшеницы в нашем опыте при применении микробных препаратов возрастало в результате увеличения массы зерна и побочной продукции в 1,2 раза – с 13,6 до 15,7 г/м<sup>2</sup> (см. табл.). Благодаря инокуляции семян и увеличению дозы аммиачной селитры до N<sub>90</sub> содержание общего азота в растениях повышалось в 1,10...1,15 раза. Применение изучаемых микробных препаратов и внесение аммиачной селитры в дозе N<sub>90</sub> увеличивало содержание меченого азота удобрения в биомассе яровой пшеницы, включающей зерно и солому, в 1,11...1,82 раза, по отношению к фону N<sub>45</sub>P<sub>45</sub>K<sub>45</sub>.

В ходе эксперимента установлено, что увеличение дозы аммиачной селитры сопровождалось повышением неучтенных потерь азота минерального удобрения из почвы. Использование биопрепаратов, содержащих штаммы Ч-13 и V 167, для обработки семян достоверно снижало их на 11...27 %, по сравнению с другими вариантами эксперимента. Максимальное остаточное количество минерального азота в почве после сбора урожая (1,77 и 1,81 г/м<sup>2</sup>) выявлено в вариантах с применением аммиачной селитры без биопрепаратов.

Инокуляция семян яровой пшеницы биопрепаратами сопровождалась тенденцией к снижению остаточного количества минерального азота в темно-серой лесной почве на 21...27 %, по сравнению с применением N<sub>45</sub>P<sub>45</sub>K<sub>45</sub>, что свидетельствует о лучшем его использовании растениями на формирование биомассы [7].

Накопление <sup>15</sup>N в биомассе яровой пшеницы имело явную тенденцию к увеличению при использовании эндофитных биопрепаратов, иммобилизация этого элемента в почве снижалась, более высокой она была при внесении

дозы N<sub>90</sub>. Суммарное содержание азота в минеральной форме, которое включает в себя азот, внесенный в виде минерального удобрения, азот, оставшийся в почве после выращивания культуры, а также азот удобрения, который был иммобилизован и закреплен в темно-серой лесной почве, варьировало от 25,4 до 34,9 г/м<sup>2</sup>. При внесении N<sub>90</sub> отмечено максимальное в опыте количество минерализованного азота, в варианте с N<sub>45</sub> величина этого показателя в почве была ниже, а при инокуляции семян биопрепаратами содержание минерализованного азота имело тенденцию к снижению и составляло 25,4...28,6 г/м<sup>2</sup>. Все это свидетельствует о большем его использовании растениями на формирование биомассы [8]. Количество нетто-минерализованного азота, включающего N аммиачной селитры, N-остаточный минеральный и N-закрепленный в почве, изменялось от 17,9 до 25,0 г/м<sup>2</sup>. Инокуляция семян изучаемыми микробными препаратами приводила к его снижению до 18,0...21,4 г/м<sup>2</sup>, при этом более значимым было действие биопрепаратов, изготовленных с использованием штаммов Ч-13 и V 167.

В ходе эксперимента установлено, что соотношение между количеством (ре)иммобилизованного азота (РИ) и минерализованного почвенного азота (М) варьировало в диапазоне от 25 % до 31 %, что характеризует уровень воздействия применяемых удобрений и биопрепаратов на агроэкосистему яровой пшеницы как допустимый и предельный. При использовании азотного удобрения в дозах N<sub>45</sub> и N<sub>90</sub> агроэкосистема яровой пшеницы функционирует в режиме резистентности, при этом уровень воздействия на нее оценивается как предельно допустимый. Соотношение РИ: М при использовании стандартного биопрепарата Ч-13 и эндофитного V 167 повышается до 30...31 %, что характеризует режим функционирования агроэкосистемы как резистентность, а уровень воздействия – как предельно допустимый.

По соотношению нетто-минерализованного (Н-М) азота к реиммобилизованному (РИ), изменявшемуся по вариантам опыта от 2,24 до 2,98 ед., уровень воздействия на агроэкосистему яровой пшеницы на темно-серой лесной почве оценивается как предельно допустимый, при внесении аммиачной селитры в дозе N<sub>45</sub> величина этого показателя составляет 2,82, N<sub>90</sub> – 2,53. Применение биопрепаратов на основе штаммов Ч-13, V 167 и V 417 поддерживает состояние агроэкосистемы в режиме функционирования, оцениваемом как резистентность. Уровень воздействия на агроэкосистему при этом считается минимальным и не выходит за пределы допустимого.

**Выводы.** В результате исследований с использованием стабильного изотопа азота  $^{15}\text{N}$  установлено, что формирование массы зерна и соответствующего ей количества соломы яровой пшеницы на одну пядю от общего потребления обеспечивает биологический азот, поступающий в результате ассоциативной азотфиксации. Наибольшее его количество, соответствующее  $\frac{1}{4}$  общего накопления в растениях, отмечено при инокуляции семян яровой пшеницы эндофитным штаммом V 417. При внесении азотного удобрения в количестве  $\text{N}_{45}$  наблюдали повышение урожайности яровой пшеницы благодаря этому источнику на 15 %, а при удвоении дозы доля  $^{15}\text{N}$  удобрений возрастает до 24 %. Применение под яровую пшеницу аммиачной селитры в результате увеличения минерализации почвенного азота повышает долю «экстра-азота» в урожае до 11,5...12,1 %. При инокуляции семян биопрепаратами, величина этого показателя снижается до 8,5 %.

Коэффициент использования  $^{15}\text{N}$  растениями при внесении  $\text{N}_{45}$  составляет 46 %, а на фоне применения биопрепаратов возрастает до 51...53 %. В темно-серой лесной почве закрепляется 32 %  $^{15}\text{N}$  от внесенного с дозой  $\text{N}_{45}$ , на фоне биопрепаратов величина этого показателя снижается до 29 %. Неучтенные газообразные потери  $^{15}\text{N}$  в агроэкосистеме яровой пшеницы на темно-серой лесной почве достигают 33...36 % от внесенной дозы минеральных удобрений, микроорганизмы, входящие в состав биопрепаратов, уменьшают их в 2 раза. После уборки яровой пшеницы в темно-серой лесной почве при использовании биопрепаратов обнаружено меньшее количество минерального азота, по сравнению с вариантами с внесением азотного удобрения в обеих дозах, что свидетельствует о более эффективном использовании его растениями. Состояние режима функционирования агроэкосистемы яровой пшеницы, оцениваемое по соотношению РИ: М (%) и Н-М: РИ при внесении азотного удобрения в форме аммиачной селитры и инокуляции семян биопрепаратами, характеризуется как резистентность, а уровень воздействия на агроэкосистему при этом считается минимальным и не выходит за пределы допустимого.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ.

Работа финансировалась за счет средств гранта РНФ № 22-26-00105. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство этим конкретным исследованием получено не было.

#### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ.

В работе отсутствуют исследования человека или животных.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.

Авторы работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Литература.

1. Кирюшин В. И. Научно-инновационное обеспечение приоритетов развития сельского хозяйства // Почвоведение. 2019. Т. 33. № 3. С. 5–10. doi: 10.24411/0235-2451-2019-10301.
2. Шафран С. А. Баланс азота в земледелии России и его регулирование в современных условиях // Агрохимия. 2020. № 6. С. 14–21. doi: 10.31857/S0002188120060113.
3. Шабаетов В. П. Отзывчивость растений на применение азотфиксирующих бактерий в различных почвенных условиях // Российская сельскохозяйственная наука. 2021. № 4. С. 51–54. doi: 10.31857/S0002188121090106.
4. Алферов А. А., Чернова Л. С., Кожемяков А. П. Эффективность применения биопрепарата на яровой пшенице в Европейской части России на разных фонах минерального питания // Российская сельскохозяйственная наука. 2017. № 6. С. 17–21.
5. Эндофитные бактерии – основа комплексных микробных препаратов для сельского и лесного хозяйства / В. К. Чеботарь, А. В. Щербаков, С. Н. Масленникова и др. // Агрохимия. 2016. № 11. С. 65–70.
6. Здоровая почва – условие устойчивости и развития агро- и социосфер (проблемно-аналитический обзор) / М. С. Соколов, В. М. Семенов, Ю. Я. Спиридонов и др. // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2020. № 1. С. 12–21. doi: 10.31857/S000232920010142.
7. Использование яровой пшеницей азота удобрений при инокуляции семян биопрепаратами / А. А. Завалин, Дж. Ньямбосе, Л. С. Чернова и др. // Российская сельскохозяйственная наука. 2022. № 6. С. 9–13. doi: 10.31857/S2500262722060023.
8. Кореньков Д. А. Агроэкологические аспекты применения азотных удобрений. М.: Агроконсалт, 1999. 296 с.
9. Завалин А. А., Соколов О. А., Шмырева Н. Я. Развитие агрохимических исследований с изотопом  $^{15}\text{N}$  в России // Плодородие. 2021. № 3. С. 56–56. doi: 10.256880/S19948603.2021.120.10.
10. Помазкина Л. В. Новый интегральный подход к оценке режимов функционирования агроэкосистем и экологическому нормированию антропогенной нагрузки, включая техногенное загрязнение почв // Успехи современной биологии. 2004. Том. 124. № 1. С. 66–76.
11. Сравнительная оценка состояния агроэкосистем на разных типах почв Прибайкалья, загрязненных фторидами алюминиевого производства / Л. В. Помазкина, Л. Г. Котова, Л. Г. Зорина и др. // Почвоведение. 2008. № 6. С. 717–725.

Поступила в редакцию 14.08.2024  
После доработки 03.09.2024  
Принята к публикации 01.10.2024