

Номер 7

ISSN 0002-1881  
Июль 2023



# АГРОХИМИЯ

[www.sciencejournals.ru](http://www.sciencejournals.ru)



# СОДЕРЖАНИЕ

Номер 7, 2023

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

### Плодородие почв

- Восполнение гумуса за счет пожнивно-корневых остатков в льняных севооборотах  
*Н. Н. Кузьменко* 3
- Показатели плодородия агросерой почвы вишневого сада  
при применении азотных и калийных удобрений  
*Т. А. Роева, Е. В. Леоничева, Л. И. Леонтьева* 9

### Удобрения

- Влияние минеральных удобрений и подсева трав на трансформацию  
ботанического состава травостоя на выработанном торфянике  
*Т. Ю. Анисимова* 19
- Влияние длительного применения удобрений  
на почвообитающие микромицеты луговой черноземовидной почвы в посевах пшеницы  
*Л. П. Шумилова, Е. В. Банецкая* 27

### Пестициды

- Композиции фунгицидов с регуляторами роста для уменьшения  
ретардантного действия протравителей зерновых культур  
*О. В. Зорькина, Е. А. Сухова, О. О. Агапова, Е. Э. Нефедьева,  
И. Р. Грибуст, О. В. Колотова* 37

### Агроэкология

- Оценка эмиссии парниковых газов и запасов углерода  
при нулевой обработке чернозема в условиях лесостепной зоны Среднего Поволжья  
*Л. В. Орлова, Н. М. Троц, В. И. Платонов, Е. В. Балашов, С. В. Сушко,  
И. Н. Колесниченко, С. В. Орлов, Е. В. Круглов* 44
- Эндوفитные штаммы *Bacillus thuringiensis* для разработки средств  
контроля численности колорадского жука в посадках картофеля  
*А. В. Сорокань, Г. В. Беньковская, И. С. Марданишин, В. Ю. Алексеев,  
С. Д. Румянцев, И. В. Максимов* 55
- Краевая обработка поля и полезащитных лесных насаждений  
от сорняков и вредителей  
*И. М. Киреев, З. М. Коваль, М. В. Данилов* 64

### Экотоксикология

- Мониторинг  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{40}\text{K}$  в дерново-подзолистых почвах и растениях  
реперных участков Ивановской области  
*А. А. Уткин, Н. И. Аканова, И. Б. Нода* 75

### Обзоры

- Агрогеохимические технологии управления потоками  $\text{CO}_2$  в агроэкосистемах. Сообщение 2.  
Восстановление микробного звена агрогеохимического круговорота  
*В. Н. Башкин, Р. А. Галиulina* 86

# Contents

---

No. 7, 2023

---

## EXPERIMENTAL ARTICLES

### Soil Fertility

- Replenishment of Humus due to Crop-Root Residues in Flax and Crop Rotations  
*N. N. Kuzmenko* 3
- Agrochemical Conditions of Loamy Haplic Luvisol at Sour Cherry Orchard  
after 6-Year Treatments by Nitrogen and Potassium Fertilizers  
*T. A. Roeva, E. V. Leonicheva, L. I. Leontieva* 9
- 

### Fertilizers

- Transformation of the Botanical Composition of the Herbage with the Use  
of Mineral Fertilizers and Sowing Seeds on the Developed Peat Bog  
*T. Yu. Anisimova* 19
- Effect of Long-Term Use of Fertilizers on Soil-Dwelling Micromycetes  
of Meadow Chernozem Soil in Wheat Crops  
*L. P. Shumilova, E. V. Banetskaya* 27
- 

### Pesticides

- Compositions of Fungicides with Growth Regulators which Reduce  
the Retarding Effect of Crop Protectants  
*O. V. Zorkina, E. A. Sukhova, O. O. Agapova, E. E. Nefedieva,  
I. R. Gribust, O. V. Kolotova* 37
- 

### Agroecology

- Assessment of Greenhouse Gas Emissions and Carbon Reserves  
with Zero Processing of Chernozem in the Conditions  
of the Forest-Steppe Zone of the Middle Volga Region  
*L. V. Orlova, N. M. Trots, V. I. Platonov, E. V. Balashov, S. V. Sushkod,  
I. N. Kolesnichenko, S. V. Orlov, E. V. Kruglov* 44
- Endophytic Strains of *Bacillus thuringiensis* for the Development of Means  
to Control the Number of the Colorado Potato Beetle in Potato Crops  
*A. V. Sorokan, G. V. Benkovskaya, I. S. Mardanshin, V. Yu. Alekseev,  
S. D. Rumyantsev, I. V. Maksimov* 55
- Edge Treatment of the Field and Field-Protective Forest Plants from Weeds and Pests  
*I. M. Kireev, Z. M. Koval, M. V. Danilov* 64
- 

### Ecotoxicology

- Monitoring of  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{40}\text{K}$  in Sod-Podzolic Soils and Plants  
of Reference Sites of the Ivanovo Region  
*A. A. Utkin, N. I. Akanova, I. B. Noda* 75
- 

## REVIEWS

- Agrogeochemical Technologies for Managing  $\text{CO}_2$  Flows in Agroecosystems  
Message 2. Restoration of the Microbial Link of the Agrogeochemical Cycle  
*V. N. Bashkin, R. A. Galiulina* 86
-

## ВОСПОЛНЕНИЕ ГУМУСА ЗА СЧЕТ ПОЖНИВНО-КОРНЕВЫХ ОСТАТКОВ В ЛЬНЯНЫХ СЕВООБОРОТАХ<sup>1</sup>

© 2023 г. Н. Н. Кузьменко

Федеральный научный центр лубяных культур  
170041 Торжок, Тверская обл., Комсомольский просп., 17/56, Россия

E-mail: kuzmenko.nataliya2010@mail.ru

Поступила в редакцию 14.02.2023 г.

После доработки 20.03.2023 г.

Принята к публикации 15.04.2023 г.

В Центральном районе Нечерноземной зоны России на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в длительном стационарном опыте в льняных севооборотах изучили процесс восполнения гумуса за счет пожнивно-корневых остатков. Чередование культур в севообороте в 2004–2011 гг.: пар чистый – озимая рожь с подсевом многолетних трав (клевер красный и тимофеевка) – многолетние травы 1-го года пользования – многолетние травы 2-го года пользования – лен-долгунец – картофель – ячмень – овес. В 2012–2018 гг. из севооборота был исключен картофель. Вклад возделываемых культур в накопление органического вещества почвы различался. Наибольшее количество пожнивно-корневых остатков (6.8 т/га) оставалось в почве после уборки многолетних трав, что обеспечило положительный баланс гумуса в размере +1.35 т/га. В севообороте с картофелем без применения удобрений дефицит гумуса составил –0.20 т/га, при исключении картофеля из севооборота дефицит снизился до –0.05 т/га в год. Применение удобрений повысило продуктивность севооборотов в среднем на 75%, количество пожнивно-корневых остатков увеличилось на 10.6 т/га или на 58%, что позволило получить положительный баланс гумуса в почве. Применение удобрений в дозе (NPK)200 (навоз 5 т/га + (NPK)135 и навоз 5.7 т/га + (NPK)120) в 8-польном севообороте с чистым паром и картофелем при насыщении на 25% многолетними травами обеспечило баланс гумуса +0.17 т/га в год, в 7-польном севообороте с чистым паром и без картофеля при насыщении на 28.5% многолетними травами – +0.43 т/га в год.

**Ключевые слова:** льняной севооборот, пожнивно-корневые остатки, гумус, баланс.

**DOI:** 10.31857/S0002188123070074, **EDN:** OFWFIL

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных задач современного земледелия является сохранение плодородия почвы. Повысить плодородие почвы только за счет навоза и минеральных удобрений очень затратно. Кроме того, количество полученных и внесенных в почву органических удобрений недостаточно для поддержания бездефицитного баланса гумуса. Существенным фактором в сохранении и воспроизводстве плодородия дерново-подзолистых почв в Нечерноземной зоне в современных условиях являются растительные остатки, которые остаются в поле после уборки сельскохозяйственных культур [1, 2].

Опытные данные показывают, что наибольшее количество растительных остатков в почву поступает при возделывании многолетних трав (7–8 т/га), однолетних зерновых и зернобобовых культур (0.8–3.0 т/га), и меньше всего остатков остается в почве после пропашных культур (1.3–2.7 т/га) [3–5]. Между поступлением пожнивно-корневых остатков в почву и урожаем основной продукции существует тесная зависимость. Количество и качество пожнивно-корневых остатков зависят от структуры севооборота, биологических особенностей культуры и технологии их возделывания. Положительное влияние растительных остатков на показатели плодородия почвы наряду с увеличением органического вещества проявляется и в улучшении качественного состава гумуса [6, 7].

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках Государственного задания Федерального научного центра лубяных культур (№ FGSS-2019-0017).

Таблица 1. Насыщенность севооборотов удобрениями

| Вариант | 8-я ротация<br>8-польный севооборот              | 9-я ротация<br>7-польный севооборот             |
|---------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1       | Без удобрения (контроль)                         | Без удобрения (контроль)                        |
| 2       | Навоз 5.0 т/га + (NPK) 67.5 = 135 кг д.в. NPK/га | Навоз 5.7 т/га + (NPK) 77 = 150 кг д.в. NPK/га  |
| 3       | Навоз 5.0 т/га + (NPK) 135 = 200 кг д.в. NPK/га  | Навоз 5.7 т/га + (NPK) 120 = 200 кг д.в. NPK/га |

При этом значительно повышается роль севооборота, т.к. изменяя структуру посевных площадей, можно управлять поступлением органического вещества с растительными остатками возделываемых культур и обеспечить сохранение плодородия почвы. В этом плане большая масса пожнивно-корневых остатков может являться одним из самых дешевых органических удобрений. Цель работы — изучение возможности сохранения плодородия дерново-подзолистой почвы за счет пожнивно-корневых остатков в льняных севооборотах.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено в Центральном районе Нечерноземной зоны в длительном стационарном опыте ОП НИИЛ ФНЦ ЛК на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в льняном севообороте. В 2004–2011 гг. в 8-й ротации севооборота был 8-польным: 1 — пар чистый, 2 — озимая рожь с подсевом многолетних трав (клевер красный и тимофеевка), 3 — многолетние травы 1-го года пользования, 4 — многолетние травы 2-го года пользования, 5 — лен-долгунец, 6 — картофель, 7 — ячмень, 8 — овес. В 2012–2018 гг. в 9-й ротации из схемы был исключен картофель, и севооборот стал 7-польным. Многолетние травы в структуре севооборота занимали 25.0 и 28.5% соответственно.

Для обсуждения результатов в данной статье предложены варианты, представленные в табл. 1. Дозы навоза и минеральных удобрений и общая насыщенность 1 га севооборотной площади удобрениями в ротациях различались незначительно.

Навоз в 8-польном севообороте вносили 2 раза равными дозами — в пару под озимую рожь и под картофель, в 7-польном — 1 раз под озимую рожь. Использовали подстилочный навоз крупного рогатого скота с содержанием: N — 0.5,  $P_2O_5$  — 0.25,  $K_2O$  — 0.6%. Минеральные удобрения вносили под все культуры севооборота в соответствии с их биологическими потребностями. Использовали  $N_{aa}$ ,  $P_c$  (N6P26) и  $K_x$ .

Опыт проводили в одной закладке, методом рендомизированного размещения вариантов. Повторность опыта трехкратная, площадь опытной делянки — 90 и 72, учетной — 50 и 36 м<sup>2</sup> соответственно в 8-й и 9-й ротации. Агротехнические мероприятия проводили в соответствии с рекомендованной для данной зоны технологии возделывания. Исследования и наблюдения в опыте проводили согласно методическим указаниям. Урожайность культур учитывали методом пробного снопа с площадок площадью 1 м<sup>2</sup> [8].

Условный баланс гумуса в севообороте рассчитывали расчетным методом по разности между выходом его из пожнивно-корневых остатков (ПКО) и потерями гумуса при минерализации (не учитывали поступление с навозом, из других источников, вынос урожаем и т.п.). Для расчета использовали нормативы накопления пожнивно-корневых остатков для различных сельскохозяйственных культур в почвах Нечерноземной зоны и средние данные минерализации гумуса и коэффициенты гумификации растительных остатков. Коэффициент гумификации ПКО картофеля был принят за 0.10, для всех остальных культур — 0.25 [3, 9, 10].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Восполнение потерь органического вещества почвы осуществляется главным образом за счет внесения органических удобрений, а также за счет гумификации органического вещества пожнивно-корневых остатков при выращивании различных культур в севообороте. Их количество и качество зависят от биологических особенностей сельскохозяйственных культур, структуры севооборота и урожайности основной продукции, т.к. существует тесное соотношение между поступлением пожнивно-корневых остатков в почву и урожаем основной продукции [3].

По данным опыта, вклад различных культур, возделываемых в севооборотах, в накопление органического вещества в почве различался. Наибольшее количество ПКО в почве оставалось по-

**Таблица 2.** Урожайность культур и образование пожнивно-корневых остатков в севооборотах

| Чередование культур<br>(продукция)                | Урожайность, ц/га    |                                    |                                   | Количество ПКО, т/га |                                    |                                   |
|---------------------------------------------------|----------------------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
|                                                   | 8-польный севооборот |                                    |                                   |                      |                                    |                                   |
|                                                   | Без<br>удобрения     | Навоз<br>5.0 т/га +<br>+ (NPK)67.5 | Навоз<br>5.0 т/га +<br>+ (NPK)135 | Без<br>удобрения     | Навоз<br>5.0 т/га +<br>+ (NPK)67.5 | Навоз<br>5.0 т/га +<br>+ (NPK)135 |
| Чистый пар                                        | 0                    | 0                                  | 0                                 | 0                    | 0                                  | 0                                 |
| Озимая рожь (зерно)                               | 15.9                 | 20.3                               | 20.8                              | 2.4                  | 3.0                                | 3.1                               |
| Многолетние травы 1-го года<br>пользования (сено) | 38.0                 | 92.0                               | 97.2                              | 5.3                  | 8.3                                | 8.8                               |
| Многолетние травы 2-го года<br>пользования (сено) | 33.4                 | 46.0                               | 46.6                              | 4.7                  | 6.0                                | 6.1                               |
| Лен-долгунец                                      | 40.5                 | 57.8                               | 55.1                              | 1.3                  | 1.9                                | 1.9                               |
| Картофель (клубни)                                | 97.4                 | 153.7                              | 150.4                             | 1.4                  | 2.0                                | 1.9                               |
| Ячмень (зерно)                                    | 12.1                 | 23.6                               | 28.5                              | 1.6                  | 2.8                                | 3.4                               |
| Овес (зерно)                                      | 15.7                 | 28.5                               | 33.7                              | 2.0                  | 3.4                                | 3.7                               |
| За севооборот, ц з.е./га, т/га                    | 21.9                 | 35.7                               | 37.7                              | 18.7                 | 27.4                               | 28.9                              |
| Чередование культур<br>(продукция)                | 7-польный севооборот |                                    |                                   |                      |                                    |                                   |
|                                                   | Без<br>удобрения     | Навоз<br>5.7 т/га +<br>+ (NPK)77   | Навоз<br>5.7 т/га +<br>+ (NPK)120 | Без<br>удобрения     | Навоз<br>5.7 т/га +<br>+ (NPK)77   | Навоз<br>5.7 т/га +<br>+ (NPK)120 |
|                                                   | Без<br>удобрения     | Навоз<br>5.7 т/га +<br>+ (NPK)77   | Навоз<br>5.7 т/га +<br>+ (NPK)120 | Без<br>удобрения     | Навоз<br>5.7 т/га +<br>+ (NPK)77   | Навоз<br>5.7 т/га +<br>+ (NPK)120 |
| Чистый пар                                        | 0                    | 0                                  | 0                                 | 0                    | 0                                  | 0                                 |
| Озимая рожь (зерно)                               | 13.2                 | 23.7                               | 27.8                              | 2.1                  | 3.3                                | 3.6                               |
| Многолетние травы 1-го года<br>пользования (сено) | 35.9                 | 93.3                               | 81.2                              | 5.0                  | 8.4                                | 7.3                               |
| Многолетние травы 2-го года<br>пользования (сено) | 34.6                 | 74.7                               | 71.2                              | 4.8                  | 8.9                                | 8.5                               |
| Лен-долгунец (льносолома)                         | 43.8                 | 64.2                               | 74.4                              | 1.4                  | 2.1                                | 2.5                               |
| Ячмень (зерно)                                    | 19.5                 | 37.2                               | 40.2                              | 2.5                  | 3.7                                | 4.0                               |
| Овес (зерно)                                      | 15.5                 | 25.0                               | 31.6                              | 2.0                  | 3.0                                | 3.5                               |
| За севооборот: ц з.е./га, т/га                    | 22.7                 | 40.3                               | 42.4                              | 17.8                 | 29.4                               | 29.4                              |

сле многолетних трав 1-го и 2-го года пользования (клевер красный + тимофеевка), что согласовалось с данными других исследователей [1, 5]. При урожайности сена от 33.4 до 93.3 ц/га в почве оставалось ПКО от 4.7 до 8.9 т/га. В результате их гумификации в почве образовалось гумуса от 1.17 до 2.24 т/га, что обеспечивало его положительный баланс в размере от +0.91 до +1.90 т/га (табл. 2, 3).

Среди зерновых культур наибольшее количество ПКО оставалось в почве после озимой ржи: от 2.1 до 3.3 т/га. Однако из-за высокой минерализации гумуса в ее посевах (1.20 т/га) получен

отрицательный баланс гумуса независимо от внесения удобрений: от –0.10 до –0.47 т/га. Урожайность зерна озимой ржи находилась в пределах от 13.2 до 27.8 ц/га.

При урожайности ячменя и овса от 12.1 до 15.7 ц/га в варианте без удобрений баланс гумуса был отрицательным и составил от –0.09 до –0.21 т/га. При повышении урожайности ячменя до 19.5 ц/га в варианте без внесения удобрений в 7-польном севообороте баланс гумуса был слабо положительным – +0.06 т/га. Внесение удобрений повысило урожайность зерна до 23.6–40.2 ц/га, обеспечило увеличение количества ПКО и поло-

Таблица 3. Восполнение гумуса в севооборотах за счет пожнивно-корневых остатков

| Чередование культур                            | Минерализация гумуса, т/га | Образование гумуса из ПКО, т/га |                            |                           | Условный баланс, ± т/га |                            |                           |
|------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|
|                                                |                            | 8-польный севооборот            |                            |                           |                         |                            |                           |
|                                                |                            | Без удобрения                   | Навоз 5.0 т/га + (NPK)67.5 | Навоз 5.0 т/га + (NPK)135 | Без удобрения           | Навоз 5.0 т/га + (NPK)67.5 | Навоз 5.0 т/га + (NPK)135 |
| Чистый пар                                     | −1.50                      | 0                               | 0                          | 0                         | −1.50                   | −1.50                      | −1.50                     |
| Озимая рожь                                    | −1.00                      | 0.60                            | 0.76                       | 0.78                      | −0.40                   | −0.24                      | −0.22                     |
| Многолетние травы 1-го года пользования (сено) | −0.30                      | 1.33                            | 2.07                       | 2.19                      | +1.03                   | +1.77                      | +1.89                     |
| Многолетние травы 2-го года пользования (сено) | −0.30                      | 1.17                            | 1.50                       | 1.51                      | +0.87                   | +1.20                      | +1.21                     |
| Лен-долгунец                                   | −0.60                      | 0.34                            | 0.48                       | 0.48                      | −0.27                   | −0.12                      | −0.12                     |
| Картофель                                      | −1.20                      | 0.20                            | 0.30                       | 0.29                      | −1.00                   | −0.90                      | −0.91                     |
| Ячмень                                         | −0.60                      | 0.39                            | 0.71                       | 0.86                      | −0.21                   | +0.11                      | +0.26                     |
| Овес                                           | −0.60                      | 0.51                            | 0.86                       | 0.93                      | −0.09                   | +0.26                      | +0.33                     |
| За севооборот                                  | −6.10                      | 4.54                            | 6.68                       | 7.04                      | −1.57                   | +0.58                      | +1.34                     |
| В год                                          | −0.76                      | 0.57                            | 0.84                       | 0.88                      | −0.20                   | +0.07                      | +0.17                     |
| Чередование культур                            | Минерализация гумуса, т/га | 7-польный севооборот            |                            |                           |                         |                            |                           |
|                                                |                            | Без удобрения                   | Навоз 5.7 т/га + (NPK)77   | Навоз 5.7 т/га + (NPK)120 | Без удобрения           | Навоз 5.7 т/га + (NPK)77   | Навоз 5.7 т/га + (NPK)120 |
| Чистый пар                                     | −1.50                      | 0                               | 0                          | 0                         | −1.50                   | −1.50                      | −1.50                     |
| Озимая рожь                                    | −1.00                      | 0.53                            | 0.83                       | 0.90                      | −0.47                   | −0.17                      | −0.10                     |
| Мн. травы 1 г.п.                               | −0.30                      | 1.26                            | 2.10                       | 1.83                      | +0.96                   | +1.80                      | +1.53                     |
| Мн. травы 2 г.п.                               | −0.30                      | 1.21                            | 2.24                       | 2.14                      | +0.91                   | +1.94                      | +1.84                     |
| Лен-долгунец                                   | −0.60                      | 0.36                            | 0.53                       | 0.61                      | −0.24                   | −0.07                      | +0.01                     |
| Ячмень                                         | −0.60                      | 0.66                            | 0.93                       | 1.00                      | +0.06                   | +0.33                      | +0.41                     |
| Овес                                           | −0.60                      | 0.50                            | 0.75                       | 0.87                      | −0.10                   | +0.15                      | +0.27                     |
| За севооборот                                  | −4.90                      | 4.52                            | 7.38                       | 7.35                      | −0.38                   | +2.48                      | +3.00                     |
| В год                                          | −0.70                      | 0.65                            | 1.05                       | 1.05                      | −0.05                   | +0.35                      | +0.43                     |

жительный баланс гумуса в размере от +0.05 до +1.34 т/га.

При достаточно высокой урожайности льно-соломы от 40.5 до 74.4 ц/га после уборки льна в почве оставалось от 1.3 до 2.5 т ПКО/га или от 0.34 до 0.61 т гумуса/га, однако потери гумуса в посевах льна были больше, чем его образовывалось из растительных остатков, дефицит составил от –0.10 до –0.27 т/га. Возделывание картофеля в 8-польном севообороте из-за низкого коэффициента гумификации растительных остатков (0.1 т/га) и высокой минерализации гумуса в посевах (–1.20 т/га)

привело к существенному дефициту гумуса от –0.91 до –1.00 т/га. Наиболее высокие потери гумуса отмечены в чистом пару [3, 9].

Применение удобрений в севооборотах повысило урожайность культур и продуктивность севооборота в целом, и, как правило, увеличило образование ПКО. В 8-польном севообороте в варианте без применения удобрений продуктивность составила 21.9 ц з.е./га, при насыщенности 1 га севооборотной площади удобрениями в дозе 135 кг д.в. NPK она увеличилась на 63% и составила 35.7 ц з.е./га, при насыщенности 200 кг д.в. NPK

увеличилась на 72% и составила 37.7 ц з.е./га. Количество ПКО за севооборот при этом увеличилось на 47 и 55% соответственно. Минерализация гумуса в 8-польном севообороте с картофелем составила 6.1 т/га, а количество гумуса, образованного из ПКО, в варианте без внесения удобрений составило 4.54 т/га, что обусловило его отрицательный баланс в размере  $-0.20$  т/га в год. Насыщенность севооборота в дозе 135 и 200 кг д.в. NPK на 1 га севооборотной площади обеспечила слабopоложительный баланс гумуса в размере  $+0.04$  и  $+0.17$  т/га в год.

В 7-польном севообороте без картофеля в варианте без применения удобрений продуктивность составила 22.7 ц з.е./га, при насыщенности 1 га севооборотной площади удобрениями в дозе 150 кг д.в. NPK она увеличилась на 78% и составила 40.3 ц з.е./га, при насыщенности 200 кг д.в. NPK увеличилась на 87% и составила 42.4 ц з.е./га. Количество ПКО за севооборот при этом увеличилось на 65% в обоих вариантах. Минерализация гумуса в севообороте без картофеля была меньше — 4.9 т/га, а количество гумуса, образованного из ПКО, в варианте без внесения удобрений было практически одинаковым — 4.52 т/га. Баланс гумуса в севообороте без картофеля и без внесения удобрений был близок к бездефицитному и составил  $-0.05$  т/га в год. Насыщенность севооборота в дозе 150 и 200 кг д.в. NPK на 1 га севооборотной площади обеспечила положительный баланс гумуса в размере  $+0.28$  и  $+0.43$  т/га в год соответственно.

### ВЫВОДЫ

1. Наибольший вклад в сохранение плодородия дерново-подзолистой почвы среди возделываемых культур в льняных севооборотах обеспечивали многолетние травы 1-го и 2-го года пользования (клевер красный и тимофеевка). При средней урожайности сена 62 ц/га в почве образовывалось 6.8 т пожнивno-корневых остатков/га, в результате гумификации которых в почве создавался положительный баланс гумуса в среднем в размере  $+1.35$  т/га.

2. Получить положительный баланс гумуса без применения удобрений только за счет пожнивno-корневых остатков культур при средней продуктивности полевого севооборота 22 ц з.е./га невозможно. Дефицит гумуса в севообороте с картофелем составил  $-0.20$  т/га, при исключении картофеля из севооборота дефицит гумуса снизился до  $-0.05$  т/га в год.

3. Применение удобрений увеличило продуктивность севооборотов в среднем на 17 ц з.е./га,

пожнивno-корневые остатки повысили содержание гумуса на 10.6 т/га за севооборот, что позволило получить положительный баланс гумуса в почве в среднем  $+0.23$  т/га.

4. Наиболее высокий баланс гумуса обеспечила насыщенность севооборотов удобрениями в дозе 200 кг д.в. NPK на 1 га севооборотной площади (навоз 5.0 т/га + (NPK)135 и навоз 5.7 т/га + (NPK)120). В 8-польном севообороте (пар чистый — озимая рожь с подсевом многолетних трав (клевер красный и тимофеевка) — многолетние травы 1-го года пользования — многолетние травы 2-го года пользования — лен-долгунец — картофель — ячмень — овес) баланс гумуса составил  $+0.17$  т/га в год. При исключении из севооборота картофеля условный баланс гумуса повысился до  $+0.43$  т/га в год.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лошаков В.Г. Значение растительных остатков в воспроизводстве плодородия почв в Нечерноземной зоне // Докл. ТСХА. 2018. Вып. 290. Ч. III. С. 54–56.
2. Мудрых Н.М., Самофалова И.А. Опыт использования растительных остатков в почвах Нечерноземной зоны России (обзор) // Перм. аграрн. вестн. 2017. № 1(17). С. 88–97.
3. Лыков А.М. Гумус и плодородие почвы. М.: Моск. рабочий, 1985. 192 с.
4. Лошаков В.Г. Севооборот и плодородие почвы / Под ред. В.Г. Сычева. М.: ВНИИА, 2012. 512 с.
5. Борисова Е.Е. Роль в севооборотах многолетних трав // Вестн. НГИЭИ. 2015. № 8(51). С. 12–19.
6. Турусов В.И., Богатых О.А., Дронова Н.В., Балюнова Е.А. Роль пожнивno-корневых остатков в восстановлении плодородия почвы // Плодородие. 2020. № 4. С. 10–12.  
<https://doi.org/10.25680/S19948603.2020.115.03>
7. Пилипенко Н.Г. Влияние длительного применения элементов биологизации на основные показатели плодородия почвы и продуктивность севооборота на малогумосном малокarbonатном черноземе Забайкалья // Агрохимия. 2022. № 2. С. 3–12.  
<https://doi.org/10.31857/S0002188122020120>
8. Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями. Ч. 1. Особенности закладки и проведения длительных опытов в различных условиях. М.: ВАСХНИЛ, 1986. 146 с.
9. Дудина Н.Х., Панова Е.А., Петухов М.П. Агрохимия и система удобрения. М.: Агропромиздат, 1991. 399 с.
10. Рекомендации по поддержанию плодородия дерново-подзолистых почв в севооборотах Тверской области. Тверь, 1997. 36 с.

## Replenishment of Humus due to Crop-Root Residues in Flax and Crop Rotations

**N. N. Kuzmenko**

*Federal Scientific Center of Bast-Fiber Crops Breeding  
ul. Lunacharskogo 35, Tver region, Torzhok 172002, Russia  
E-mail: kuzmenko.nataliya2010@mail.ru*

In the Central region of the Non-Chernozem zone of Russia on sod-podzolic light loamy soil in a long stationary experiment in flax crop rotations, the process of replenishing humus due to crop-root residues was studied. Alternation of crops in the crop rotation in 2004–2011: pure steam – winter rye with sowing of perennial grasses (red clover and timofeevka) – perennial grasses of the 1<sup>st</sup> year of use – perennial grasses of the 2<sup>nd</sup> year of use – flax – potato – barley – oats. In 2012–2018, potatoes were excluded from the crop rotation. The contribution of cultivated crops to the accumulation of soil organic matter varied. The largest amount of crop-root residues (6.8 t/ha) remained in the soil after harvesting perennial grasses, which provided a positive humus balance of +1.35 t/ha. In the crop rotation with potatoes without the use of fertilizers, the humus deficit was –0.20 t/ha, with the exclusion of potatoes from the crop rotation, the deficit decreased to –0.05 t/ha per year. The use of fertilizers increased the productivity of crop rotations by an average of 75%, the amount of crop-root residues increased by 10.6 t/ha or 58%, which allowed to obtain a positive balance of humus in the soil. The use of fertilizers at a dose of (NPK)200 (manure 5 t/ha + (NPK)135 and manure 5.7 t/ha + (NPK)120) in an 8-pole crop rotation with pure steam and potatoes when saturated by 25% with perennial grasses provided a humus balance of +0.17 t/ha per year, in 7-full crop rotation with pure steam and without potatoes at saturation by 28.5% with perennial grasses – +0.43 t/ha per year.

**Keywords:** flax crop rotation, crop-root residues, humus, balance.

УДК 631.445.25:634.233:631.83/84

## ПОКАЗАТЕЛИ ПЛОДОРОДИЯ АГРОСЕРОЙ ПОЧВЫ ВИШНЕВОГО САДА ПРИ ПРИМЕНЕНИИ АЗОТНЫХ И КАЛИЙНЫХ УДОБРЕНИЙ

© 2023 г. Т. А. Роева<sup>1,\*</sup>, Е. В. Леоничева<sup>1</sup>, Л. И. Леонтьева<sup>1</sup><sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт селекции плодовых культур  
302530 Орловская обл., д. Жилина, Россия

\*E-mail: roeva@vniispk.ru

Поступила в редакцию 07.02.2023 г.

После доработки 28.02.2023 г.

Принята к публикации 15.04.2023 г.

В полевом опыте в вишневом саду оценили влияние ежегодного внесения мочевины и сульфата калия на важнейшие агрохимические свойства почвы в корнеобитаемой зоне. Почва сада – агросерая среднесуглинистая с исходно благоприятными параметрами:  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  5.8, содержание гумуса – 3.58–4.57%. Удобрения вносили с 2017 г. 1 раз в год ранней весной по схеме: 1 – контроль (без удобрений), 2 – N30K40, 3 – N60K80, 4 – N90K120, 5 – N120K160. Пробы почвы отбирали из слоев почвы 0–20, 20–40 и 40–60 см в 2017 г. (первый год опыта) и в 2022 г. (после 6-летнего внесения удобрений). Ежегодное внесение удобрений в течение 6 лет привело к значительному увеличению (в 1.4–2.2 раза) обеспеченности обменным калием в слое почвы 0–20 см при неизменном содержании гумуса во всей корнеобитаемой зоне. При этом повышение кислотности и потеря кальция происходили в верхних слоях почвы под влиянием удобрений в дозах N60K80 и более. За период 2018–2022 гг. самая высокая суммарная урожайность деревьев вишни сорта Тургеневка отмечена при внесении удобрений N60K80 и N120K160 (35.5 и 36.5 т/га соответственно), но этот прирост был незначительным по сравнению с контролем (29.3 т/га). Таким образом, агросерая среднесуглинистая почва с благоприятными агрохимическими характеристиками может обеспечивать рост и плодоношение вишневых деревьев без применения удобрений в течение 8-ми лет после посадки и при этом уровень плодородия почвы остается стабильным.

**Ключевые слова:** вишня (*Prunus cerasus* L.), систематическое применение азотных и калийных удобрений, агросерая почва, агрохимические свойства почвы, урожайность.

**DOI:** 10.31857/S0002188123070098, **EDN:** OFYWDH

### ВВЕДЕНИЕ

За последние 30 лет мировое производство вишни резко возросло. Подобные тенденции характерны и для России. В Российской Федерации в 2020 г. объем производства вишни увеличился по сравнению с 1992 г. в 1.7 раза и составил 244 800 т, а занимаемые площади под вишней составили 39 800 га [1]. Одним из важных факторов устойчивого функционирования агроэкосистем и высокой продуктивности плодовых насаждений являются свойства и уровень плодородия почвы [2]. Оптимизация свойств почвы невозможна без научно обоснованной системы удобрений. В интенсивных садах плодородие почвы может ухудшаться из-за применения высоких доз минеральных удобрений. Поэтому современная система минерального питания плодовых растений, в том числе и косточковых, направлена на снижение их количества [3]. Необходима разработка новых агротехнологий, повышающих эффективность ис-

пользования почвенных ресурсов и питательных веществ растениями. Знание процессов, происходящих в почве, с учетом специфики произрастания плодовых культур позволит избежать избытка удобрений и сохранить плодородие почвы. Плодовые культуры произрастают на одном участке в течение длительного периода, поэтому систематическое применение удобрений может значительно изменять свойства почвы под садом, что в дальнейшем изменит условия корневого питания. Такие изменения описаны для агроэкосистем с разнообразными полевыми культурами [4–6]. В них показано как благоприятное, так и негативное изменение агрохимических, физико-химических и биологических свойств почв при длительном применении минеральных и органических удобрений. Динамика почвенных характеристик под многолетними насаждениями изучена гораздо слабее и преимущественно для яблоневых садов [2, 7–10].

Влияние удобрений на изменение свойств почв под садами косточковых культур, в том числе под вишней, отражено в единичных зарубежных публикациях [11, 12]. Эти сведения затруднительно экстраполировать на российские условия из-за разнообразия плодородия почв, климата и способов выращивания культуры. Зачастую в вишневых садах рекомендуют применять высокие дозы минеральных удобрений на основе оценки их влияния на качественные показатели плодов в течение 2–3-х последовательных периодов вегетации без учета свойств почв [13–15]. Характеристику почвы в этих исследованиях обычно используют с целью оценки почвенных условий для роста деревьев, что не отражает изменений свойств почв с течением времени. Слабая изученность проблемы обуславливает необходимость длительного изучения современных почвенных процессов под вишневыми садами в связи со спецификой питания культуры в региональных условиях для разработки научно обоснованных программ минерального питания.

Цель работы — оценка влияния систематического внесения мочевины и сульфата калия на изменение агрохимических параметров агросеры почвы вишневого сада в почвенно-климатических условиях Среднерусской возвышенности.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Эксперимент проводили в течение 6-ти лет (2017–2022 гг.) в вишневом саду 2015 г. посадки, расположенном в садовом массиве ВНИИСПК (Орловская обл., 53°00′09.5″ N, 36°04′19.1″ E). Климат умеренно континентальный со среднегодовой температурой 5.5°C. Годовое количество осадков в годы проведения исследования составило 450–703 мм. Сумма положительных температур находилась в пределах 2860–3280°C.

Для проведения исследования была выбрана вишня (*Prunus cerasus* L.) сорта Тургеневка на подвое В-2-180. Схема размещения деревьев — 5 × 3 м. Почва опытного участка — агросера среднесуглинистая по классификации почв России (2004) [16] или loamy haplic Luvisol по классификации почв WRB (2014) [17].

Система содержания почвы в рядах деревьев — обработка гербицидами, в междурядьях с 2015 по 2019 г. — черный пар, а с 2020 г. — залужение. В саду проводили защитные мероприятия от вредителей и болезней, общепринятые для данной культуры.

До начала опыта органические и минеральные удобрения в экспериментальном саду не вносили. Полевой опыт по изучению эффективности ми-

неральных удобрений начат в 2017 г. Варианты опыта: 1 — контроль (без удобрений), 2 — N30K40, 3 — N60K80, 4 — N90K120, 5 — N120K160. Азотные и калийные удобрения в форме гранулированных N<sub>м</sub> и K<sub>с</sub> вносили ежегодно ранней весной (в середине апреля) перед цветением деревьев на глубину 10–15 см. Опыт проводили в трехкратной повторности с рендомизированным расположением делянок. На каждой учетной делянке расположено 4 дерева.

Почвенные образцы, смешанные из 3-х точечных проб, отбирали в 2017 и 2022 г. (в 1-й и 6-й годы внесения удобрений) в начале октября в подкормочной зоне деревьев на расстоянии 1.0–1.2 м от штамба с глубины 0–20, 20–40 и 40–60 см. В них определяли содержание обменного калия и подвижного фосфора по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26207-91), гумуса — по методу Тюрина [18]. Обменные формы кальция и магния экстрагировали 1 М NaCl и определяли комплексонометрическим методом с использованием комплексона-III (EDTA-Na<sub>2</sub>) [18]. Гидролитическую кислотность определяли в соответствии с ГОСТ 26212-91, pH<sub>KCl</sub> — в соответствии с ГОСТ 26212-91. Определение калия в экстрактах из почвы проводили на пламенном фотометре Sherwood 410 (Великобритания), фосфора — на спектрофотометре BIO RAD SmartSpek Plus (США). Учет урожая вели весовым методом с каждой делянки.

Для статистической обработки данных был использован дисперсионный анализ с оценкой значимости различий на основе критерия Фишера и *HCP* при уровне значимости  $P = 0.05$  [19].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Кислотность почвы является интегральным показателем целого комплекса свойств почвы, определяющих ее плодородие и продуктивность плодовых культур. Одним из важных агрохимических показателей является величина pH<sub>KCl</sub>, оптимум для вишни варьирует в пределах 5.3–6.0 [20].

Показано, что в яблоневых садах происходит постепенное увеличение кислотности почвы [10]. Это связывают с подкисляющим действием на почву корневой системы яблони: корни растений в процессе дыхания и при поглощении катионов выделяют в почву углекислоту и водород, которые являются динамическим фактором, воздействующим на коллоидный комплекс почвы. Нами не обнаружено такого эффекта для растений вишни. В удобренной почве показатель pH<sub>KCl</sub>

**Таблица 1.** Изменение показателей кислотности почвы при внесении минеральных удобрений

| Дозы<br>удобрений<br>(фактор А)          | Год (фактор Б)                                                                                                                       |      | Средние<br>фактора А | Год (фактор Б)                                                                                                                       |      | Средние<br>фактора А | Год (фактор Б)                                                                                                                                               |      | Средние<br>фактора А |
|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------|
|                                          | 2017                                                                                                                                 | 2022 |                      | 2017                                                                                                                                 | 2022 |                      | 2017                                                                                                                                                         | 2022 |                      |
|                                          | слой 0—20 см                                                                                                                         |      |                      | слой 20—40 см                                                                                                                        |      |                      | слой 40—60 см                                                                                                                                                |      |                      |
| pH <sub>KCl</sub>                        |                                                                                                                                      |      |                      |                                                                                                                                      |      |                      |                                                                                                                                                              |      |                      |
| Контроль                                 | 5.69                                                                                                                                 | 5.71 | 5.70                 | 5.67                                                                                                                                 | 5.62 | 5.64                 | 5.49                                                                                                                                                         | 5.65 | 5.57                 |
| N30K40                                   | 5.60                                                                                                                                 | 5.41 | 5.50                 | 5.61                                                                                                                                 | 5.51 | 5.56                 | 5.46                                                                                                                                                         | 5.71 | 5.58                 |
| N60K80                                   | 5.62                                                                                                                                 | 5.28 | 5.45                 | 5.67                                                                                                                                 | 5.54 | 5.60                 | 5.48                                                                                                                                                         | 5.44 | 5.46                 |
| N90K120                                  | 5.72                                                                                                                                 | 5.17 | 5.44                 | 5.73                                                                                                                                 | 5.65 | 5.69                 | 5.74                                                                                                                                                         | 5.54 | 5.64                 |
| N120K160                                 | 5.28                                                                                                                                 | 4.79 | 5.03                 | 5.57                                                                                                                                 | 5.38 | 5.47                 | 5.47                                                                                                                                                         | 5.28 | 5.37                 |
| Средние<br>фактора Б                     | 5.58                                                                                                                                 | 5.27 |                      | 5.65                                                                                                                                 | 5.54 |                      | 5.53                                                                                                                                                         | 5.52 |                      |
| <i>HCP</i> <sub>05</sub>                 | <i>HCP</i> <sub>05</sub> фактора А = 0.19<br><i>HCP</i> <sub>05</sub> фактора Б = 0.12<br><i>HCP</i> <sub>05</sub> фактора АБ = 0.26 |      |                      | <i>HCP</i> <sub>05</sub> фактора А = 0.16<br><i>HCP</i> <sub>05</sub> фактора Б = 0.10<br><i>HCP</i> <sub>05</sub> фактора АБ = 0.22 |      |                      | <i>HCP</i> <sub>05</sub> фактора А = $F_{\Phi} < F_T$<br><i>HCP</i> <sub>05</sub> фактора Б = $F_{\Phi} < F_T$<br><i>HCP</i> <sub>05</sub> фактора АБ = 0.33 |      |                      |
| Гидролитическая кислотность, ммоль/100 г |                                                                                                                                      |      |                      |                                                                                                                                      |      |                      |                                                                                                                                                              |      |                      |
| Контроль                                 | 3.23                                                                                                                                 | 2.34 | 2.79                 | 3.40                                                                                                                                 | 2.59 | 3.00                 | 3.94                                                                                                                                                         | 2.39 | 3.17                 |
| N30K40                                   | 3.85                                                                                                                                 | 3.44 | 3.65                 | 3.82                                                                                                                                 | 2.99 | 3.41                 | 4.92                                                                                                                                                         | 3.43 | 4.18                 |
| N60K80                                   | 3.48                                                                                                                                 | 3.85 | 3.67                 | 3.02                                                                                                                                 | 2.98 | 3.00                 | 3.70                                                                                                                                                         | 3.19 | 3.45                 |
| N90K120                                  | 2.88                                                                                                                                 | 4.24 | 3.56                 | 2.62                                                                                                                                 | 2.62 | 2.62                 | 2.49                                                                                                                                                         | 2.54 | 2.52                 |
| N120K160                                 | 4.16                                                                                                                                 | 6.05 | 5.11                 | 2.99                                                                                                                                 | 3.46 | 3.23                 | 3.02                                                                                                                                                         | 3.28 | 3.15                 |
| Средние<br>фактора Б                     | 3.52                                                                                                                                 | 3.98 |                      | 3.17                                                                                                                                 | 2.93 |                      | 3.61                                                                                                                                                         | 2.97 |                      |
| <i>HCP</i> <sub>05</sub>                 | <i>HCP</i> <sub>05</sub> фактора А = 0.65<br><i>HCP</i> <sub>05</sub> фактора Б = 0.41<br><i>HCP</i> <sub>05</sub> фактора АБ = 0.92 |      |                      | <i>HCP</i> <sub>05</sub> фактора А = 0.43<br><i>HCP</i> <sub>05</sub> фактора Б = 0.27<br><i>HCP</i> <sub>05</sub> фактора АБ = 0.61 |      |                      | <i>HCP</i> <sub>05</sub> фактора А = 1.0<br><i>HCP</i> <sub>05</sub> фактора Б = 0.64<br><i>HCP</i> <sub>05</sub> фактора АБ = 1.4                           |      |                      |

был стабильным в течение 6-ти лет исследования (табл. 1).

В длительных полевых опытах установлено, что применение минеральных удобрений в садах способствует увеличению кислотности почвы [7–9]. В нашем исследовании ежегодное внесение азотных и калийных удобрений приводило к снижению pH<sub>KCl</sub>, и скорость снижения показателя зависела от дозы удобрений. Однократное внесение N120K160 (2017 г.) уже привело к существенному снижению показателя pH<sub>KCl</sub> по сравнению с контролем. Но для более низких доз этот эффект проявился позже. После 6-ти лет ежегодного внесения удобрений (2022 г.) в вариантах N60K80–N120K160 показатель pH<sub>KCl</sub> был достоверно ниже уровня 2017 г. Достоверное изменение pH<sub>KCl</sub> отмечено только в слое 0–20 см.

Показатель гидролитической кислотности более полно отражает кислотность почвы, т.к. включает менее подвижную часть поглощенных

ионов водорода, труднее обменивающихся на катионы почвенного раствора. В 2017 г. в контроле этот показатель увеличивался с глубиной и составил 3.23–3.94 ммоль/100 г. В 2022 г. гидролитическая кислотность в контроле значительно снизилась по сравнению с уровнем 2017 г. во всех изученных слоях почвы и находилась в пределах 2.34–2.59 ммоль/100 г. Аналогичное изменение показателя отмечено и в варианте N30K40 в слое 20–60 см. В садах ВНИИСПК, благодаря близкому залеганию подстилающей породы – доломитового известняка, весь почвенный профиль обогащен карбонатами Са и Mg [21]. Поэтому причиной снижения гидролитической кислотности, по видимому, были катионы кальция, которые периодически подтягиваются из иллювиально-карбонатного горизонта вверх по профилю, вытесняя ионы водорода и алюминия из почвенно-поглощающего комплекса. Такому перемещению кальция могло способствовать увеличение годо-

**Таблица 2.** Изменение содержания обменных форм кальция и магния в почве при внесении минеральных удобрений

| Дозы<br>удобрений<br>(фактор А) | Год (фактор Б)                                                                                                                 |      | Средние<br>фактора А | Год (фактор Б)                                                                                          |      | Средние<br>фактора А | Год (фактор Б)                                                                                                                 |      | Средние<br>фактора А |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------|
|                                 | 2017                                                                                                                           | 2022 |                      | 2017                                                                                                    | 2022 |                      | 2017                                                                                                                           | 2022 |                      |
|                                 | слой 0—20 см                                                                                                                   |      |                      | слой 20—40 см                                                                                           |      |                      | слой 40—60 см                                                                                                                  |      |                      |
| Обменный Са, ммоль/100 г        |                                                                                                                                |      |                      |                                                                                                         |      |                      |                                                                                                                                |      |                      |
| Контроль                        | 19.0                                                                                                                           | 19.8 | 19.4                 | 19.5                                                                                                    | 20.3 | 19.9                 | 17.5                                                                                                                           | 19.2 | 18.3                 |
| N30K40                          | 18.4                                                                                                                           | 18.3 | 18.4                 | 18.9                                                                                                    | 19.7 | 19.3                 | 19.6                                                                                                                           | 19.9 | 19.8                 |
| N60K80                          | 18.9                                                                                                                           | 18.3 | 18.6                 | 19.7                                                                                                    | 20.1 | 19.9                 | 18.4                                                                                                                           | 19.5 | 19.0                 |
| N90K120                         | 18.7                                                                                                                           | 18.3 | 18.5                 | 19.5                                                                                                    | 20.1 | 19.8                 | 18.4                                                                                                                           | 18.1 | 18.3                 |
| N120K160                        | 18.1                                                                                                                           | 17.4 | 17.7                 | 19.1                                                                                                    | 18.9 | 19.0                 | 17.2                                                                                                                           | 18.1 | 17.7                 |
| Средние<br>фактора Б            | 18.6                                                                                                                           | 18.4 |                      | 19.4                                                                                                    | 19.8 |                      | 18.2                                                                                                                           | 19.0 |                      |
| $HCP_{05}$                      | $HCP_{05}$ фактора А = 0.8<br>$HCP_{05}$ фактора Б = $F_{\Phi} < F_T$<br>$HCP_{05}$ фактора АБ = 1.1                           |      |                      | $HCP_{05}$ фактора А = 0.5<br>$HCP_{05}$ фактора Б = 0.3<br>$HCP_{05}$ фактора АБ = 0.8                 |      |                      | $HCP_{05}$ фактора А = $F_{\Phi} < F_T$<br>$HCP_{05}$ фактора Б = $F_{\Phi} < F_T$<br>$HCP_{05}$ фактора АБ = $F_{\Phi} < F_T$ |      |                      |
| Обменный Mg, ммоль /100 г       |                                                                                                                                |      |                      |                                                                                                         |      |                      |                                                                                                                                |      |                      |
| Контроль                        | 2.94                                                                                                                           | 2.74 | 2.84                 | 3.33                                                                                                    | 2.55 | 2.94                 | 3.33                                                                                                                           | 2.45 | 2.89                 |
| N30K40                          | 3.14                                                                                                                           | 3.14 | 3.14                 | 3.14                                                                                                    | 2.65 | 2.92                 | 3.14                                                                                                                           | 2.84 | 2.99                 |
| N60K80                          | 2.94                                                                                                                           | 2.94 | 2.94                 | 3.04                                                                                                    | 2.75 | 2.90                 | 3.24                                                                                                                           | 2.45 | 2.85                 |
| N90K120                         | 3.24                                                                                                                           | 3.33 | 3.28                 | 3.14                                                                                                    | 2.55 | 2.85                 | 3.33                                                                                                                           | 2.75 | 3.04                 |
| N120K160                        | 2.94                                                                                                                           | 2.84 | 2.89                 | 3.43                                                                                                    | 3.14 | 3.29                 | 3.14                                                                                                                           | 2.84 | 2.99                 |
| Средние<br>фактора Б            | 3.04                                                                                                                           | 3.00 |                      | 3.22                                                                                                    | 2.73 |                      | 3.24                                                                                                                           | 2.67 |                      |
| $HCP_{05}$                      | $HCP_{05}$ фактора А = $F_{\Phi} < F_T$<br>$HCP_{05}$ фактора Б = $F_{\Phi} < F_T$<br>$HCP_{05}$ фактора АБ = $F_{\Phi} < F_T$ |      |                      | $HCP_{05}$ фактора А = $F_{\Phi} < F_T$<br>$HCP_{05}$ фактора Б = 0.30<br>$HCP_{05}$ фактора АББ = 0.67 |      |                      | $HCP_{05}$ фактора А = $F_{\Phi} < F_T$<br>$HCP_{05}$ фактора Б = 0.19<br>$HCP_{05}$ фактора АБ = 0.43                         |      |                      |

вого количества осадков в период проведения исследования (с 450 до 703 мм).

В начале опыта (2017 г.) при внесении самой высокой дозы N120K160 гидролитическая кислотность в слое 0–20 см достоверно возросла по сравнению с контролем. Через 6 лет систематического применения удобрений в дозах N90K120 и N120K160 этот показатель в верхнем слое почвы был существенно больше начального (в 1.5 раза). Так же, как и для показателя  $pH_{KCl}$ , существенное изменение гидролитической кислотности наблюдали только в слое 0–20 см.

Изменение реакции почвенной среды тесно связано с состоянием обменных катионов кальция и магния в почвенно-поглощающем комплексе. Кальций и магний, с одной стороны, являются жизненно-важными питательными веществами, и с другой стороны, преобладающими основаниями, которые поддерживают нейтральную реакцию почвенной среды.

Уровень доступных растениям форм кальция и магния в почве сада был достаточно высоким (табл. 2). В почве неудобренных делянок содержание обменного кальция в слое 0–20 см за 6 лет не изменилось, а в нижележащих слоях отмечено увеличение его запасов.

При внесении удобрений происходили потери обменного кальция из слоя почвы 0–20 см. Это связано с высокой миграционной способностью кальция [22]. Внесение физиологически кислых мочевины и сульфата калия сопровождается обменными физико-химическими реакциями с почвенно-поглощающим комплексом. В результате в почвенный раствор поступают анионы сильных кислот  $NO_3^-$  и  $SO_4^{2-}$ , вызывая его подкисление. При этом усиливается подвижность оснований и происходит их вымывание из корнеобитаемого слоя [23]. Потери обменного кальция из верхнего слоя почвы экспериментального сада составили от 4.6 до 35.9 кг/га в зависимости от до-

**Таблица 3.** Суммарные урожайность и вынос элементов питания с урожаем за период 2018–2022 гг.

| Вариант    | Суммарная урожайность, т/га | Суммарный вынос элементов питания урожаем, кг/га |                  |                  |                  |
|------------|-----------------------------|--------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
|            |                             | К                                                | Р                | Са               | Mg               |
| Контроль   | 29.3                        | 44.0                                             | 28.0             | 0.43             | 0.29             |
| N30K40     | 29.1                        | 49.3                                             | 29.3             | 0.44             | 0.31             |
| N60K80     | 35.5                        | 55.9                                             | 32.7             | 0.48             | 0.35             |
| N90K120    | 32.6                        | 51.2                                             | 29.4             | 0.46             | 0.36             |
| N120K160   | 36.5                        | 56.7                                             | 33.3             | 0.53             | 0.38             |
| $HCP_{05}$ | $F_{\phi} < F_T$            | $F_{\phi} < F_T$                                 | $F_{\phi} < F_T$ | $F_{\phi} < F_T$ | $F_{\phi} < F_T$ |

зы удобрений, что значительно превышало вынос кальция урожаем (табл. 3). Это свидетельствовало о слабом влиянии потребления кальция деревьями на кальциевый статус почвы. Потери обменного кальция из серых лесных почв при длительном внесении минеральных удобрений показаны и для яблоневых садов Восточно-Европейской равнины [8, 24].

Установлено, что магний обладает меньшей миграционной способностью, по сравнению с кальцием [22]. Это связано с тем, что магний — катион преимущественно октаэдрического слоя, поэтому он труднее вытесняется из решетки минералов и более прочно удерживается в поглощающем комплексе, чем кальций, который является поглощенным внутрислойным катионом [22].

Показано, что в известкованных почвах потери кальция при внесении удобрений в 2–4 раза превышали потери магния [25]. В садовых почвах юга России при орошении и фертигации происходило обеднение верхних слоев почвы кальцием и насыщение магнием [26]. В преобладающем большинстве почв Тамбовской обл. под интенсивными яблоневыми садами потери кальция в 3.7–13.2 раза превышали потери магния [10].

Главным фактором, влияющим на содержание обменного магния в почве экспериментального вишневого сада, были климатические условия, а минеральные удобрения слабо влияли на этот показатель. В нашем неорошаемом саду при систематическом внесении азотных и калийных удобрений в слое 0–20 см почвы отмечено уменьшение содержания кальция при относительном постоянстве содержания магния (табл. 2). На глубине 20–40 и 40–60 см, во всех вариантах, в том числе и в контроле, в 2022 г. наблюдали существенное снижение содержания обменного магния по сравнению с уровнем 2017 г. Следует отметить, что снижение содержания магния в слое 20–60 см произошло именно в 2022 г., т.к. оценка содержания магния в почве сада ранее этого не выявила [27].

Установлено, что ионы магния, особенно в легких почвах, могут в значительном количестве вымываться с инфильтрацией атмосферных осадков [28]. При этом до 50% потерь магния происходит осенью и весной [29]. Период вегетации 2022 г. был самым влажным и отличался экстремально высоким количеством осадков, выпавших в апреле (145 мм) и сентябре (96 мм). Поэтому снижение содержания обменного магния в нижележащих слоях почвы в 2022 г., возможно, было связано с вымыванием магния за пределы корнеобитаемого слоя.

В опытном хозяйстве был достигнут высокий уровень подвижного фосфора в почвах, поэтому в садах ВНИИСПК фосфорные удобрения не применяют. Содержание подвижных фосфатов в почве экспериментального сада было экстремально высоким (табл. 4). Во время проведения эксперимента уровень подвижных фосфатов в почве не снижался и оставался стабильно высоким во всех вариантах, вынос фосфора урожаем был небольшим и менялся в пределах 28–33 кг/га (табл. 3). Это могло быть связано с фосфатной буферной способностью данной почвы и невысокой потребностью вишни в фосфоре. Содержание его доступных форм в почве в количестве 40 мг/кг является достаточным для этой культуры [30].

После 6-ти лет применения удобрений запасы подвижного фосфора в слое 0–20 см достоверно увеличились (в 1.11–1.23 раза). Этот эффект, возможно, связан с подкислением почвы и частичным переходом фосфора из недоступных фракций в доступные. Показано, что в серой лесной почве трансформация фонда минерального фосфора происходит в основном за счет содержания наиболее доступной для растений фракции однозамещенных фосфатов кальция  $Ca-P_1$  [31]. Устойчивость различных минеральных соединений фосфора в значительной степени зависит от почвенных условий, в том числе и величины кислот-

**Таблица 4.** Изменение содержания подвижного фосфора и обменного калия в почве при внесении минеральных удобрений

| Дозы<br>удобрений<br>(фактор А)                 | Год (фактор Б)                                                                                            |      | Средние<br>фактора А | Год (фактор Б)                                                                                                                                                      |      | Средние<br>фактора А | Год (фактор Б)                                                                                                                                                                                   |      | Средние<br>фактора А |
|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------|
|                                                 | 2017                                                                                                      | 2022 |                      | 2017                                                                                                                                                                | 2022 |                      | 2017                                                                                                                                                                                             | 2022 |                      |
|                                                 | слой 0—20 см                                                                                              |      |                      | слой 20—40 см                                                                                                                                                       |      |                      | слой 40—60 см                                                                                                                                                                                    |      |                      |
| Подвижный Р <sub>2</sub> О <sub>5</sub> , мг/кг |                                                                                                           |      |                      |                                                                                                                                                                     |      |                      |                                                                                                                                                                                                  |      |                      |
| Контроль                                        | 327                                                                                                       | 309  | 318                  | 299                                                                                                                                                                 | 317  | 308                  | 142                                                                                                                                                                                              | 181  | 162                  |
| N30K40                                          | 333                                                                                                       | 380  | 357                  | 323                                                                                                                                                                 | 338  | 330                  | 178                                                                                                                                                                                              | 210  | 194                  |
| N60K80                                          | 336                                                                                                       | 379  | 358                  | 306                                                                                                                                                                 | 318  | 312                  | 181                                                                                                                                                                                              | 198  | 189                  |
| N90K120                                         | 340                                                                                                       | 376  | 358                  | 313                                                                                                                                                                 | 331  | 322                  | 175                                                                                                                                                                                              | 198  | 186                  |
| N120K160                                        | 336                                                                                                       | 415  | 376                  | 310                                                                                                                                                                 | 347  | 328                  | 146                                                                                                                                                                                              | 210  | 178                  |
| Средние<br>фактора Б                            | 334                                                                                                       | 372  |                      | 310                                                                                                                                                                 | 330  |                      | 164                                                                                                                                                                                              | 199  |                      |
| HCP <sub>05</sub>                               | HCP <sub>05</sub> фактора А = 18<br>HCP <sub>05</sub> фактора Б = 12<br>HCP <sub>05</sub> фактора АБ = 26 |      |                      | HCP <sub>05</sub> фактора А = F <sub>ф</sub> < F <sub>т</sub><br>HCP <sub>05</sub> фактора Б = 19<br>HCP <sub>05</sub> фактора АБ = F <sub>ф</sub> < F <sub>т</sub> |      |                      | HCP <sub>05</sub> фактора А = F <sub>ф</sub> < F <sub>т</sub><br>HCP <sub>05</sub> фактора Б = 29<br>HCP <sub>05</sub> фактора АБ = F <sub>ф</sub> < F <sub>т</sub>                              |      |                      |
| Обменный К <sub>2</sub> О, мг/кг                |                                                                                                           |      |                      |                                                                                                                                                                     |      |                      |                                                                                                                                                                                                  |      |                      |
| Контроль                                        | 122                                                                                                       | 178  | 150                  | 77.7                                                                                                                                                                | 72.9 | 75.3                 | 44.6                                                                                                                                                                                             | 53.6 | 49.1                 |
| N30K40                                          | 148                                                                                                       | 263  | 205                  | 91.0                                                                                                                                                                | 100  | 95.7                 | 65.8                                                                                                                                                                                             | 57.5 | 61.7                 |
| N60K80                                          | 145                                                                                                       | 243  | 194                  | 82.6                                                                                                                                                                | 109  | 95.8                 | 56.2                                                                                                                                                                                             | 57.0 | 56.6                 |
| N90K120                                         | 197                                                                                                       | 270  | 233                  | 107.1                                                                                                                                                               | 102  | 105                  | 63.3                                                                                                                                                                                             | 57.2 | 60.3                 |
| N120K160                                        | 126                                                                                                       | 282  | 204                  | 81.4                                                                                                                                                                | 113  | 96.9                 | 65.8                                                                                                                                                                                             | 61.3 | 63.6                 |
| Средние<br>фактора Б                            | 148                                                                                                       | 247  |                      | 88.0                                                                                                                                                                | 99.3 |                      | 59.1                                                                                                                                                                                             | 57.3 |                      |
| HCP <sub>05</sub>                               | HCP <sub>05</sub> фактора А = 35<br>HCP <sub>05</sub> фактора Б = 22<br>HCP <sub>05</sub> фактора АБ = 50 |      |                      | HCP <sub>05</sub> фактора А = 22<br>HCP <sub>05</sub> фактора Б = F <sub>ф</sub> < F <sub>т</sub><br>HCP <sub>05</sub> фактора АБ = 31                              |      |                      | HCP <sub>05</sub> фактора А = F <sub>ф</sub> < F <sub>т</sub><br>HCP <sub>05</sub> фактора Б = F <sub>ф</sub> < F <sub>т</sub><br>HCP <sub>05</sub> фактора АБ = F <sub>ф</sub> < F <sub>т</sub> |      |                      |

ности почвенного раствора. Фосфаты кальция наиболее устойчивы в условиях щелочной или близкой к нейтральной реакции среды, а при подкислении растворимость этих соединений увеличивается [32]. Нами установлен высокий отрицательный коэффициент корреляции между содержанием подвижного фосфора в слое почвы 0–20 см и показателем рН<sub>КCl</sub> ( $r = -0.71$ ,  $P > 0.01$ ). Полученные результаты согласуются с исследованиями других авторов [5]. В нижележащих слоях почвы количество подвижного фосфора под влиянием удобрений в течение времени исследования существенно не изменилось.

Вишневые деревья потребляют из почвы значительные количества калия, который по уровню поглощения находится на 2-м месте после азота [33]. Запасы обменных соединений являются основным источником для стабилизации количества калия в почвенном растворе при потреблении элемента растениями [34]. При выращивании пло-

вых культур без применения удобрений может происходить значительное снижение содержания обменного калия и продуктивности растений уже через 8 лет [35].

Калийный баланс сельскохозяйственных почв определяется запасами калия в почве, поступлением его с удобрениями, выносом элемента урожаем и вымыванием во влажные годы. На неудобренных делянках суммарный вынос калия урожаем в первые годы плодоношения деревьев (2018–2022 гг.) составил 44.0 кг/га (табл. 3). При таком выносе различия в содержании обменного калия в неудобренной почве были статистически незначимыми в годы проведения опыта. Это могло происходить из-за способности данной почвы поддерживать оптимальный уровень обменного калия посредством его перехода из необменных форм [34].

Показано, что длительное систематическое внесение калийных удобрений в садах приводило

Таблица 5. Изменение содержания гумуса в почве при внесении минеральных удобрений, %

| Дозы<br>удобрений<br>(фактор А) | Год (фактор Б)                                |      | Средние<br>фактора А | Год (фактор Б)                                |      | Средние<br>фактора А | Год (фактор Б)                                |      | Средние<br>фактора А |
|---------------------------------|-----------------------------------------------|------|----------------------|-----------------------------------------------|------|----------------------|-----------------------------------------------|------|----------------------|
|                                 | 2017                                          | 2022 |                      | 2017                                          | 2022 |                      | 2017                                          | 2022 |                      |
|                                 | слой 0—20 см                                  |      |                      | слой 20—40 см                                 |      |                      | слой 40—60 см                                 |      |                      |
| Контроль                        | 4.57                                          | 4.53 | 4.55                 | 4.51                                          | 4.32 | 4.42                 | 3.58                                          | 3.68 | 3.63                 |
| N30K40                          | 4.43                                          | 4.55 | 4.49                 | 4.33                                          | 4.17 | 4.25                 | 4.10                                          | 4.15 | 4.12                 |
| N60K80                          | 4.59                                          | 4.76 | 4.68                 | 4.56                                          | 4.54 | 4.55                 | 4.41                                          | 4.27 | 4.34                 |
| N90K120                         | 4.29                                          | 4.42 | 4.36                 | 3.98                                          | 4.20 | 4.09                 | 2.83                                          | 3.60 | 3.22                 |
| N120K160                        | 4.54                                          | 4.45 | 4.50                 | 4.40                                          | 4.36 | 4.38                 | 3.64                                          | 3.18 | 3.41                 |
| Средние<br>фактора Б            | 4.48                                          | 4.54 |                      | 4.36                                          | 4.32 |                      | 3.71                                          | 3.78 |                      |
| $HCP_{05}$                      | $HCP_{05}$ фактора А = $F_{\phi} < F_{\tau}$  |      |                      | $HCP_{05}$ фактора А = $F_{\phi} < F_{\tau}$  |      |                      | $HCP_{05}$ фактора А = $F_{\phi} < F_{\tau}$  |      |                      |
|                                 | $HCP_{05}$ фактора Б = $F_{\phi} < F_{\tau}$  |      |                      | $HCP_{05}$ фактора Б = $F_{\phi} < F_{\tau}$  |      |                      | $HCP_{05}$ фактора Б = $F_{\phi} < F_{\tau}$  |      |                      |
|                                 | $HCP_{05}$ фактора АБ = $F_{\phi} < F_{\tau}$ |      |                      | $HCP_{05}$ фактора АБ = $F_{\phi} < F_{\tau}$ |      |                      | $HCP_{05}$ фактора АБ = $F_{\phi} < F_{\tau}$ |      |                      |

к увеличению запасов обменного калия в почве [7, 11, 36]. В экспериментальном вишневом саду, за 6 лет проведения опыта с удобрениями в почву было внесено калия от 240 до 960 кг/га, тогда как суммарный вынос калия урожаем за этот период составил 49.3–56.7 кг/га (табл. 3). Благодаря систематическому внесению удобрений запасы обменного калия в слое 0–20 см почвы существенно увеличились (в 1.4–2.2 раза) и к 2022 г. достигли высокого уровня, который по градации для плодовых культур превышал 200 мг/кг [37]. Четырехкратное увеличение дозы калийных удобрений (от 40 до 160 кг/га) не способствовало пропорциональному увеличению запасов обменного калия. В 2022 г. содержание обменного калия в почве удобренных делянок достоверно не различалось. Вероятно, уровень обменного калия  $264 \pm 21$  мг/кг соответствовал максимальной емкости почвы по отношению к этому элементу. В таком случае при внесении дополнительных количеств калия с удобрениями элемент почти не удерживался в форме обменных катионов, а мигрировал в нижележащие слои почвы в виде более подвижных соединений. Тенденция к обогащению калием более глубоких слоев почвы видна в табл. 5 и была ранее показана в работе [38].

Важнейшим интегральным показателем уровня плодородия почв является содержание в них гумуса. Его количественный и качественный состав определяет биологические, агрохимические и агрофизические свойства почвы. При многолетней эксплуатации садов без использования удобрений содержание гумуса может по-разному изменяться в разных регионах и зависит от начальных его запасов в почве и климатических условий [39]. Например, в условиях Юга России

при выращивании яблони без удобрений, содержание гумуса не изменялось в течение первых 6-ти лет после посадки деревьев, тогда как через 12 лет величины этого показателя были значительно меньше исходного уровня [40]. В почвах лесостепи Украины, напротив, отмечены снижение содержания гумуса в молодых садах и его рост с увеличением возраста деревьев и количества растительного опада [8].

Содержание гумуса в слое 0–60 см почвы экспериментального сада находилось в пределах 3.58–4.57% (табл. 5). Под воздействием монокультуры вишневого сада без внесения удобрений не происходило изменения содержания гумуса в первые годы плодоношения деревьев. Систематическое внесение азотных и калийных удобрений не оказывало достоверного влияния на этот показатель. Различия в содержании гумуса были результатом пространственного варьирования плодородия почвы.

В научной литературе имеются сведения о положительном влиянии минеральных удобрений на урожайность вишни [41, 42]. В Польше, в течение 8-летнего эксперимента, проведенного в интенсивных, ежегодно обрезаемых вишневых садах с высокой плотностью посадки деревьев (1250 и 1920 шт./га) установлено достоверное увеличение суммарной урожайности вишни при внесении азотных удобрений в дозах 60 и 120 кг/га [42].

В нашем вишневом саду с меньшей плотностью посадки (666 деревьев/га), где обрезку не проводили и вынос элементов питания был небольшим и только с плодами, внесение азотных и калийных удобрений не оказало значимого влияния на суммарную урожайность деревьев вишни в

первые 5 лет плодоношения (табл. 3). В вариантах с дозами удобрений N60K80 и более суммарная урожайность деревьев была на 11–25% больше контроля, но эти величины не были статистически достоверными. По-видимому, молодые деревья вишни удовлетворяли свои потребности в элементах питания за счет естественного плодородия почвы с высоким содержанием органического вещества. Биологические особенности минерального питания многолетних плодовых деревьев, такие как способность запасать и повторно использовать питательные вещества для начального роста весной, поглощение элементов питания в течение длительного периода вегетации, дифференцированный характер распределения корней позволяют им наиболее эффективно расходовать питательные вещества по сравнению с однолетними культурами.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что ежегодное применение удобрений в дозах N30K40–N90K120 способствовало увеличению запасов обменного калия в верхнем слое 0–20 см почвы и не влияло на содержание органического вещества в корнеобитаемом слое почвы сада. При этом под действием удобрений в дозах свыше N60K80 происходило увеличение кислотности почвы и потери обменного кальция в слое 0–20 см почвы. Применение удобрений не оказало достоверного влияния на суммарную урожайность вишни в первые годы плодоношения. Таким образом, агросерая среднесуглинистая почва, имеющая благоприятные агрохимические показатели, может обеспечивать рост и плодоношение вишневых деревьев без дополнительного применения удобрений в течение 8-ми лет после посадки сада.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. FAOSTAT Crops. <http://faostat.fao.org/beta/en/#data/QC>
2. Zhao J., Liu Z., Zhai B., Jin H., Xu X., Zhu Y. Long-term changes in soil chemical properties with cropland-to-orchard conversion on the Loess Plateau, China: Regulatory factors and relations with apple yield // *Agricult. Syst.* 2023. V. 204. P. 103562. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2022.103562>
3. Milošević T., Milošević N. (2020) Soil fertility: Plant nutrition vis-à-vis fruit yield and quality of stone fruits (Chapter 41) / Eds. A.K. Srivastava, Chengxiao Hu, // *Fruit Crops. Diagnosis and Management of Nutrient Constraints*. Elsevier, 2020. P. 583–606. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818732-6.00041-1>
4. Бурдуковский М.Л., Голов В.И., Ковшик И.Г. Изменение агрохимических свойств основных пахотных почв юга Дальнего Востока при длительном сельскохозяйственном использовании // *Почвоведение*. 2016. № 10. С. 1244–1250. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16100051>
5. Васбиева М.Т. Изменение фракционного состава минеральных фосфатов, содержания подвижного фосфора и степени подвижности фосфатов по профилю дерново-подзолистой почвы при длительном применении удобрений // *Агрохимия*. 2021. № 7. С. 3–12. <https://doi.org/10.31857/S0002188121070115>
6. Завьялова Н.Е., Васбиева М., Шишков Д.Г., Казакова И.В. Влияние минеральных удобрений на трансформацию калийного фонда дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почвы // *Агрохимия*. 2022. № 1. С. 3–9. <https://doi.org/10.31857/S0002188122010136>
7. Ge S., Zhu Z., Jiang Y. Long-term impact of fertilization on soil pH and fertility in an apple production system // *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2018. V. 18. № 1. P. 282–293. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162018005001002>
8. Kopytko P., Karpenko V., Yakovenko R., Mostoviak I. Soil fertility and productivity of apple orchard under a long-term use of different fertilizer systems // *Agron. Res.* 2017. V. 15. № 2. P. 444–455.
9. Сергеева Н.Н., Ярошенко О.В. Влияние возрастающих доз минеральных удобрений на агрохимические свойства серой лесостепной почвы предгорной зоны Краснодарского края // *Плод-во и ягод-во России*. 2020. Т. 58. С. 350–355. <https://doi.org/10.31676/2073-4948-2019-58-350-355>
10. Захаров В.Л. Изменение свойств и снижение бонитета почв разных типов в яблоневых садах Тамбовской области // *Вестн. КрасГАУ*. 2010. № 10. С. 30–36.
11. Milošević T., Milošević N. The effect of organic fertilizer, composite NPK and clinoptilolite on changes in the chemical composition of degraded Vertisol in Western Serbia // *Carpath. J. Earth Environ. Sci.* 2010. V. 5. № 1. P. 25–32.
12. Rutkowski K., Łysiak G.P., Zydlik Z. Effect of nitrogen fertilization in the sour cherry orchard on soil enzymatic activities, microbial population, and fruit quality // *Agriculture*. 2022. V. 12. № 12. P. 2069. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122069>
13. Uçgun K. Effects of nitrogen and potassium fertilization on nutrient content and quality attributes of sweet cherry fruits // *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*. 2019. V. 47. № 1. P. 114–118. <https://doi.org/10.15835/nbha47111225>
14. Yener H., Altuntaş Ö. Effects of potassium fertilization on leaf nutrient content and quality attributes of sweet cherry fruits (*Prunus avium* L.) // *J. Plant Nutr.* 2021. V. 44. № 7. P. 946–957. <https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1862203>
15. Ateş Ö., Alveroğlu V., Turhan E. Yalçın, G. Taşpınar K., Kizilaslan F. Effects of potassium fertilization on sweet cherry fruit (*Prunus avium* L.) Quality and mineral content // *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2022. V. 53. № 14. P. 1777–1782. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2063322>

16. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
17. IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No.106. Rome: FAO, 2014. 181 p.
18. Минеев В.Г., Сычев В.Г., Амеляничик О.А., Большеева Т.Н., Гомонова Н.Ф., Дурынина Е.П., Егоров В.С., Егорова Е.В., Едемская Н.Л., Карпова Е.А., Прижуклова В.Г. Практикум по агрохимии. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
19. Шеуджен А.Х., Бондарева Т.Н. Методика агрохимических исследований и статистическая оценка их результатов: уч. пособ. 2-е изд. Майкоп: ОАО "Полиграф-ЮГ", 2015. 664 с.
20. Овчаренко М.М., Некрасов Р.В., Аканова Н.И., Прудников П.В., Осипов А.И. Приемы повышения плодородия почв (известкование, фосфоритование, гипсование). Науч.-метод. рекоменд. М.: Росинформагротех, 2021. 116 с.
21. Кузнецов М.Н., Леоничева Е.В., Роева Т.А., Мотыльва С.М., Малякко Г.П., Сычев С.М. Содержание подвижных форм тяжелых металлов в почве садовых агроценозов юга Нечерноземья // Совр. сад-во—Contemporary horticulture. 2012. № 1. С. 24–33.
22. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М. Потери Са, Mg, K, Na, Fe и F из орошаемой лугово-сероземной почвы в результате миграции. Эмпирические модели процесса элювирования (по данным лабораторного опыта) // Агрохимия. 2020. № 1. С. 58–69. <https://doi.org/10.31857/S0002188120010056>
23. Ягодин Б.А. Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И. Агрохимия. М.: Колос, 2002. 584 с.
24. Leonicheva E., Stolyarov M., Roeva T., Leonteva L. Calcium in the "soil-plant" system of apple orchard when using nitrogen and potash fertilizers // E3S Web of Conferences. V. 254. P. 05010. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125405010>
25. Салаев И.В., Литвинович А.В. Интенсивность миграции кальция и магния из дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, мелиорируемой крупными фракциями отсева щебеночного производства // Агрофизика. 2018. № 2. С. 22. <https://doi.org/10.25695/AGRPH.2018.02.04>
26. Фоменко Т.Г., Попова В.П., Черников Е.А. Влияние химической мелиорации на физико-химические свойства черноземных почв орошаемых плодовых питомников // Рос. сел.-хоз. наука. 2018. № 2. С. 44–49.
27. Roeva T., Leonicheva E., Leonteva L. Changes of the agrochemical soil characteristics in the stone fruit orchard with the permanent application of nitrogen and potash fertilizers // BIO Web of Conferences. EDP Sciences. 2022. V. 47. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20224709003>
28. Аканова Н.И., Шильников И.А., Ефремова С.Ю., Аваков М.С. Значение химической мелиорации в земледелии и потери кальция и магния из почвы // Пробл. агрохим. и экол. 2017. № 1. С. 28–35.
29. Grzebisz W. Magnesium—food and human health // J. Elementol. 2011. V. 16. №. 2. P. 299–323.
30. Ystaas J., Froeynes O. Sweet cherry nutrition: effects of phosphorus and other major elements on vigour, productivity, fruit size and fruit quality of 'Kristin' sweet cherries grown on a virgin, acid soil // Norw. J. Agric. Sci. 1995. V. 9. P. 105–114.
31. Якименко В.Н. Влияние длительного применения калийных удобрений на агрохимические свойства почвы // Агрохимия. 2012. №. 12. С. 41–46.
32. Сычев В.Г., Кирпичников Н.А. Приемы оптимизации фосфатного режима почв в агротехнологиях. М.: ВНИИА, 2009. 176 с.
33. Baghdadi M., Sadowski A. Estimation of nutrient requirements of sour cherry // Acta Hort. 1998. № 468. P. 515–522. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.1998.468.64>
34. Якименко В.Н. Действие и последствие калийных удобрений в полевом опыте на серой лесной почве // Агрохимия. 2015. № 3. С. 3–12.
35. Gomand A., Vercammen J., Siongers V., Bylemans D. Multiyear field trials to balance the nutrition of nitrogen and potassium for 'Conference' pear // Acta Hort. 2018. V. 1217. P. 239–246. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1217.30>
36. Gao Y., Tong Y., Lu Y., Ma H. Effect of long-term application of nitrogen, phosphorus and potassium on apple yield and soil nutrient accumulation and distribution in orchard soil of Loess Plateau // J. Fruit Sci. 2012. V. 29. № 3. P. 322–327.
37. Кондаков А.К. Удобрение плодовых деревьев, ягодников, питомников и цветочных культур. Мичуринск: ООО "БИС", 2007. 328 с.
38. Roeva T., Leonicheva E., Leonteva L., Stolyarov M. Potassium dynamics in orchard soil and potassium status of sour cherry trees affected by soil nutritional conditions // J. Central Europ. Agric. 2022. V. 23. № 1. P. 103–113.
39. Сергеева Н.Н., Савин И.Ю., Трунов Ю.В., Драгавцева И.А., Моренец А.С. Многолетняя динамика агрохимических свойств черноземов под яблоневыми садами // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2018. № 93. С. 21–39.
40. Sergeeva N., Yaroshenko O. The application of biomodified fertilizers as a way to increase the effective fertility of orchard soils // BIO Web Conferences. EDP Sci. 2021. V. 34. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20213405001>
41. Szűcs E. Nutrient demand of stone fruits // Inter. J. Horticult. Sci. 2003. V 9. № 2. P. 19–23. <https://doi.org/10.31421/IJHS/9/2/385>
42. Rutkowski K., Łysiak G.P. Weather conditions, orchard age and nitrogen fertilization influences yield and quality of 'Łutówka' Sour cherry fruit // Agriculture. 2022. V. 12. №. 12. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122008>

## Agrochemical Conditions of Loamy Haplic Luvisol at Sour Cherry Orchard after 6-Year Treatments by Nitrogen and Potassium Fertilizers

T. A. Roeva<sup>a, #</sup>, E. V. Leonicheva<sup>a</sup>, and L. I. Leontieva<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Russian Research Institute of Fruit Crop Breeding  
302530 Orel region, d. Zhilina, Russia

<sup>#</sup> E-mail: roeva@vniispk.ru

In a field experiment in a cherry orchard, the effect of annual application of urea and potassium sulfate on the most important agrochemical properties of the soil in the root zone was evaluated. The soil of the garden is medium-loamy agro-gray with initially favorable parameters:  $pH_{KCl}$  5.8, humus content – 3.58–4.57%. Fertilizers have been applied since 2017 1 time a year in early spring according to the scheme: 1 – control (without fertilizers), 2 – N30K40, 3 – N60K80, 4 – N90K120, 5 – N120K160. Soil samples were taken from soil layers 0–20, 20–40 and 40–60 cm in 2017 (the first year of experience) and in 2022 (after 6 years of fertilization). The annual application of fertilizers for 6 years led to a significant increase (by 1.4–2.2 times) in the availability of exchangeable potassium in the soil layer of 0–20 cm with a constant humus content in the entire root zone. At the same time, an increase in acidity and loss of calcium occurred in the upper layers of the soil under the influence of fertilizers in doses of N60K80 or more. For the period 2018–2022, the highest total yield of Turgenevka cherry trees was noted when applying fertilizers N60K80 and N120K160 (35.5 and 36.5 t/ha, respectively), but this increase was insignificant compared to the control (29.3 t/ha). Thus, an agro-gray medium loamy soil with favorable agrochemical characteristics can ensure the growth and fruiting of cherry trees without the use of fertilizers for 8 years after planting and at the same time the level of soil fertility remains stable.

**Keywords:** cherry (*Prunus cerasus* L.), permanent application of nitrogen and potash fertilizers, Haplic Luvisol, agrochemical properties of soil, yield.

УДК 631.81:633.2:631.445.124

## ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ И ПОДСЕВА ТРАВ НА ТРАНСФОРМАЦИЮ БОТАНИЧЕСКОГО СОСТАВА ТРАВСТОЯ НА ВЫРАБОТАННОМ ТОРФЯНИКЕ

© 2023 г. Т. Ю. Анисимова

*Всероссийский научно-исследовательский институт органических удобрений и торфа –  
филиал Верхневолжского ФАНЦ*

*ул. Прянишникова, 2, п. Вяткино, Судогодский р-н, Владимирская обл. 601390, Россия*

*E-mail: anistan2009@mail.ru*

Поступила в редакцию 13.02.2023 г.

После доработки 03.03.2023 г.

Принята к публикации 15.04.2023 г.

Приведены результаты 5-летнего исследования изменения ботанического состава сеяных и природных травостоев, свойств почвы в зависимости от примененных агроприемов, которые включали прямой сев трав в дернину выработанного торфяника и применение минеральных удобрений. Внешение минеральных удобрений способствовало обогащению почвы доступными питательными веществами, что позволило повысить продуктивность трав в сочетании с подсевом в 2.0–4.7 раза, улучшить их качество за счет оптимизации ботанического состава травостоя. Установлено, что применение минеральных удобрений в дозах N60P60K90 и N60P90K120 в вариантах с природным и культурным фитоценозами обеспечивало увеличение доли ценных бобовых и злаковых трав, снижая долю разнотравья с 53 до 25–34%.

**Ключевые слова:** минеральные удобрения, подсев, травостой, ботанический состав, выработанный торфяник.

**DOI:** 10.31857/S0002188123070037, **EDN:** OEXABQ

### ВВЕДЕНИЕ

При решении экологических проблем использования и охраны выработанных торфяников актуальным является вопрос создания на торфяных почвах культурных долголетних сенокосов. Приемы рационального использования луговых угодий и повышения продуктивности сенокосов должны основываться на применении простых и эффективных ресурсосберегающих технологий поверхностного улучшения лугов при выращивании на них многолетних трав, которые наиболее адаптированы к условиям выработанных торфяников: утилизируют энергию солнца, атмосферные осадки, полнее используют почвенный азот, полностью исключают ветровую эрозию почв [1].

Одними из основных и действенных способов увеличения продуктивности луговых трав является применение минеральных удобрений и подсев семян трав в ненарушенную дернину. Известно, что их использование результативно на всех типах луговых угодий, но наиболее эффективно на увлажненных почвах [2, 3]. Подсев трав позволяет сохранить структуру почвы и имеющиеся на ней

кормовые растения, что позволяет избежать недостатка кормов, который сказывается еще несколько лет после пересева [4, 5]. При этом для подсева пригодны только быстро произрастающие и энергично растущие растения, в особенности клевер розовый и тимopheевка. Для подсева достаточно 1/3–1/2 посевной нормы [6].

В многолетних бобово-злаковых травах, высеянных для улучшения лугового фитоценоза, накопление вегетативной массы зависит от вида и соотношения компонентов, применения системы удобрения. Ботанический состав формируемого травостоя характеризует его хозяйственную целесообразность. Знание направленности трансформационных процессов в агрофитоценозах дает возможность прогнозировать изменения ботанического состава, продуктивность трав и качество корма в определенных почвенно-климатических условиях. Важно, чтобы бобовые травы обеспечивали достаточно высокую урожайность в смешанном травостое, а злаковые компоненты не подавляли бобовые травы [3].

Ботанический состав травостоя претерпевает большие изменения в течение всей жизни трав за счет вытеснения одних видов другими, более приспособленными, наиболее резко это проявляется в первые годы после посева [1, 4, 7].

Цель работы — выявление закономерностей формирования видовой структуры и производительности сеяных и природных бобово-злаковых травостоев для определения динамики изменений ботанического состава природных и культурных фитоценозов в зависимости от примененных агроприемов.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили во Владимирской обл. на Байгушском мелкоконтурном торфяном месторождении. Тип торфяной залежи — переходный (А — 15.4, R — 45%). Общая площадь торфяного массива составляла 13.8 га, после проведения в 1985 г. мелиорации массив был разделен на 6 торфяных карт. До 2015 г. в сельскохозяйственном пользовании находились площади 1-й и 2-й торфяных карт, которые почти полностью сработаны и их использовали в основном под сенокос, в настоящее время площади заброшены.

На части 1-й торфяной карты после скашивания растительности и удаления кустарничков в 2017 г. был заложен полевой опыт по определению влияния применения минеральных удобрений и прямого сева семян многолетних трав на продуктивность фитоценозов и свойства почвы. Почва болотно-подзолистая (Gleyic (Histic) Albeluvisols) со следующими агрохимическими показателями: содержание гумуса — 1.86–2.0%,  $pH_{KCl}$  6.1–6.4, содержание подвижного фосфора — 56–75, обменного калия — 46.5–58.2 мг/кг. Мощность пахотного слоя — 27–39 см. Тип растительности на участке был определен как деградированный разнотравно-злаковый луг. В дернину высевали бобово-злаковую травосмесь (2/3 от полной нормы посева), состоящую из быстрорастущих растений, таких как клевер розовый (*Trifolium hybridum*) и тимофеевка луговая (*Phleum pratense*). Минеральные удобрения вносили по схеме в виде аммиачной селитры, простого суперфосфата и калимага. Реализация исследовательских работ была основана на методике проведения опытов на сенокосах и пастбищах [8].

Исследования проводили с 2017 по 2021 г. согласно схеме, варианты:

1 — природный фитоценоз (ПФ) без подсева клеверо-тимофеечной смеси (контроль), 2 — ПФ + N60P60K90, 3 — ПФ + N60P90K120. 4 — культурный фитоценоз (КФ) с подсевом клеверо-ти-

мофеечной смеси, 5 — КФ + N60P60K90, 6 — КФ + N60P90K120. Общая площадь делянки — 62.5, учетная — 40 м<sup>2</sup>, повторность четырехкратная, общая площадь под опытом — 0.15 га.

Азотные удобрения вносили дробно: в период весеннего отрастания (вместе с фосфорными и калийными) и после первого укоса трав.

Учеты урожая надземной массы трав выполнены с использованием портативной косилки, сплошное скашивание трав проведено ротационной навесной косилкой КРН-2,1, агрегатированной с МТЗ-82. Представлены суммарные за 2 укоса урожаи трав в фазе годности для приготовления сена: колошение у злаковых, цветение у бобовых.

Анализ почвенных образцов выполнены в лаборатории с использованием следующих методов:  $pH_{KCl}$  — по методу ЦИНАО (ГОСТ 26483-85), гидролитическая кислотность — по методу Каппена в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26212-91), сумма поглощенных оснований — по методу Каппена (ГОСТ 27821-88), подвижные соединения фосфора и калия — по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО (ГОСТ Р 54650-2011).

Анализ растительных образцов проводили в лаборатории следующими методами: содержание азота — по ГОСТ Р 51417-99 с дальнейшим пересчетом в сырой протеин (коэффициент 6.25), фосфора — по ГОСТ 26657-97, калия — по ГОСТ 30504-97, содержание сухого вещества — по ГОСТ 31640-2012, ботанический состав травостоя, расчет обменной энергии и кормовых единиц — по ГОСТ Р 56912-2016 (корма зеленые) и другим методикам [9, 10].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Метеорологические условия вегетационных периодов (апрель–сентябрь) в годы исследования оказывали различное влияние на продуктивность трав. После посева погодные условия благоприятствовали всхожести семян: при невысоких температурах воздуха выпало 118–181% осадков от нормы (табл. 1). Дефицит атмосферных осадков в начале лета оказал негативное влияние на урожайность трав 1-го года пользования (г.п.). При выращивании трав 2-го года пользования погодные условия в начале вегетации трав, а также в период наибольшего их роста и развития отмечены как засушливые, после 1-го укоса трав количество осадков составило 135–182% от среднесуточной нормы на фоне невысоких температур воздуха, что свидетельствовало о перенасыщении почвы и в целом не способствовало

формированию большой биомассы трав. Погодные условия при выращивании трав 3-го г.п. можно назвать идеальными для растений: достаточное количество осадков при теплой погоде, что благоприятно сказалось на урожае. При возделывании трав 4-го г.п. отмечен дефицит осадков, температура воздуха в течение лета превышала среднегодовую норму в среднем на 2,3°C. Таким образом, судя по величине гидротермического коэффициента, 40% вегетационных периодов характеризовались как неблагоприятные, 60% — как вполне благоприятные при среднегодовом показателе ГТК = 1.3 [11].

Анализ агрохимических свойств почвы полевого опытного участка показал, что применение изученных приемов не оказало негативного влияния на показатели рН и суммы обменных оснований в корнеобитаемом слое почвы. Сумма обменных оснований на 5-й год после закладки опыта возросла и оставалась на одном уровне. Отмечено увеличение содержания подвижного фосфора и обменного калия в верхнем слое почвы в вариантах с применением минеральных удобрений. В удобренных вариантах повышение относительно исходного содержания доступных растениям фосфора и калия составило 50–74 и 87–118 мг/кг соответственно. В вариантах без применения удобрений прирост составил: подвижного фосфора — 5 и обменного калия — 10 мг/кг. Таким образом, применение минеральных удобрений в течение 5-ти лет возделывания трав способствовало увеличению запасов подвижного фосфора и обменного калия в верхнем слое почвы.

У кормовых трав в отличие от других сельскохозяйственных культур используют надземную массу растений — листья, стебли, соцветия, которые являются источником питательных веществ и определяют их ценность как корма для животных [2, 9, 12]. Поэтому, чем больше в составе зеленой массы ценных бобовых и злаковых трав, тем выше качество корма. В ходе эксперимента нами были подтверждены основные положения формирования состава травостоя под влиянием минеральных удобрений, установленные многочисленными исследованиями в различных почвенно-климатических условиях (табл. 2).

Оценка ботанического состава травостоя в контрольном варианте показала, что соотношение компонентов не изменялось на протяжении всего периода исследования (рис. 1). Доля злаковых растений составляла в среднем 27, бобовых — 6, разнотравья — 53, вредных и ядовитых — 12%. Флористический состав растений был представлен малоценными в кормовом отношении травами: злаковых — белоусом, полевицей, щучкой,

**Таблица 1.** Гидротермический коэффициент (ГТК) в период проведения исследования

| Условия увлажнения | Год наблюдений | Возраст трав | ГТК  |
|--------------------|----------------|--------------|------|
| Средневлажный      | 2017           | Посев        | 1.55 |
| Острозасушливый    | 2018           | 1-й г.п.*    | 0.90 |
| Нормальный         | 2019           | 2-й г.п.     | 1.27 |
| Нормальный         | 2020           | 3-й г.п.     | 1.34 |
| Острозасушливый    | 2021           | 4-й г.п.     | 0.80 |

\*г.п. — год пользования. То же в табл. 2, 3.

пыреем; бобовых — клевером белым, мышиным горошком; разнотравья — тысячелистником, одуванчиком, осокой, щавелем конским; вредных и ядовитых растений — звездчаткой, чистецом, калужницей, лютиками, мордовником, хвощами, полынью и др. Наличие вредных и ядовитых растений согласно ГОСТ Р 56912-2016. (Корма зеленые) свидетельствовало о непригодности травостоя для корма животных.

В варианте с культурным фитоценозом без удобрений доля бобовых в среднем за 4 года пользования превосходила количество злаковых растений, а также количество бобовых в контроле. На 4-й год пользования доля бобовых намного превзошла количество злаковых растений в удобренных вариантах без подсева, что было обусловлено и замедленным без достаточного минерального питания развитием подсеянного клевера, который к тому же обладает способностью биологической азотфиксации в отличие от злаковых, и засушливой погодой, которая была благоприятной для развития бобовых. Использование подсева способствовало изменению флористического состава злакового и бобового компонента уже со 2-го года проведения опыта (1 г.п.), среди злаковых доминировала тимopheевка, среди бобовых — клевер розовый. Но при применении только подсева не удалось избежать наличия в травостое вредных и ядовитых растений: их доля составляла в среднем 1.5–5.6%, что делало травостой непригодным для кормления животных.

Учет ботанического состава травостоя 1-го г.п. показал, что в вариантах с удобренным природным фитоценозом доля злаковых трав была больше на 21.4% доли бобовых, т.е. злаки в этих вариантах были более конкурентоспособными в отношении основных элементов минерального питания и положительно реагировали на внесение удобрений (рис. 1а). Подсев в сочетании с применением минеральных удобрений благотворно повлиял на развитие бобового компонента травостоя, в вариантах с культурным фитоценозом их доля возрос-

**Таблица 2.** Изменение травостоя в зависимости от примененных агроприемов и продолжительности использования травостоем

| Вариант                  | Ботанический состав травостоя, % |          |          |          |                   |          |          |          |
|--------------------------|----------------------------------|----------|----------|----------|-------------------|----------|----------|----------|
|                          | злаки                            |          |          |          | бобовые           |          |          |          |
|                          | 1-й г.п.                         | 2-й г.п. | 3-й г.п. | 4-й г.п. | 1-й г.п.          | 2-й г.п. | 3-й г.п. | 4-й г.п. |
| Природный фитоценоз      |                                  |          |          |          |                   |          |          |          |
| Без удобрений (контроль) | 24.2                             | 27.2     | 32.5     | 25.2     | 12.0              | 1.7      | 3.2      | 3.6      |
| N60P60K90                | 42.2                             | 51.8     | 43.0     | 45.4     | 14.1              | 22.0     | 17.4     | 15.1     |
| N60P90K120               | 43.8                             | 44.8     | 34.5     | 29.0     | 19.7              | 38.5     | 40.0     | 26.5     |
| Культурный фитоценоз     |                                  |          |          |          |                   |          |          |          |
| Без удобрений            | 17.4                             | 30.0     | 36.9     | 14.3     | 26.2              | 32.4     | 12.5     | 55.2     |
| N60P60K90                | 23.4                             | 49.6     | 41.0     | 28.2     | 41.4              | 29.2     | 30.2     | 46.8     |
| N60P90K120               | 27.9                             | 42.7     | 38.0     | 21.4     | 45.0              | 42.8     | 35.0     | 56.6     |
| Вариант                  | Ботанический состав травостоя, % |          |          |          |                   |          |          |          |
|                          | разнотравье, включая осоковые    |          |          |          | вредные, ядовитые |          |          |          |
|                          | 1-й г.п.                         | 2-й г.п. | 3-й г.п. | 4-й г.п. | 1-й г.п.          | 2-й г.п. | 3-й г.п. | 4-й г.п. |
| Природный фитоценоз      |                                  |          |          |          |                   |          |          |          |
| Без удобрений (контроль) | 54.6                             | 58.3     | 51.8     | 58.5     | 9.2               | 12.8     | 12.5     | 12.5     |
| N60P60K90                | 40.3                             | 26.2     | 39.6     | 39.5     | 3.4               | 0.0      | 0.0      | 0.0      |
| N60P90K120               | 36.5                             | 16.7     | 25.5     | 44.5     | 0.0               | 0.0      | 0.0      | 0.0      |
| Культурный фитоценоз     |                                  |          |          |          |                   |          |          |          |
| Без удобрений            | 50.8                             | 36.1     | 49.0     | 27.5     | 5.6               | 1.5      | 1.6      | 3.0      |
| N60P60K90                | 33.9                             | 21.2     | 28.8     | 25.0     | 1.3               | 0        | 0.0      | 0.0      |
| N60P90K120               | 27.1                             | 14.5     | 27.0     | 21.7     | 0.0               | 0        | 0.0      | 0.0      |

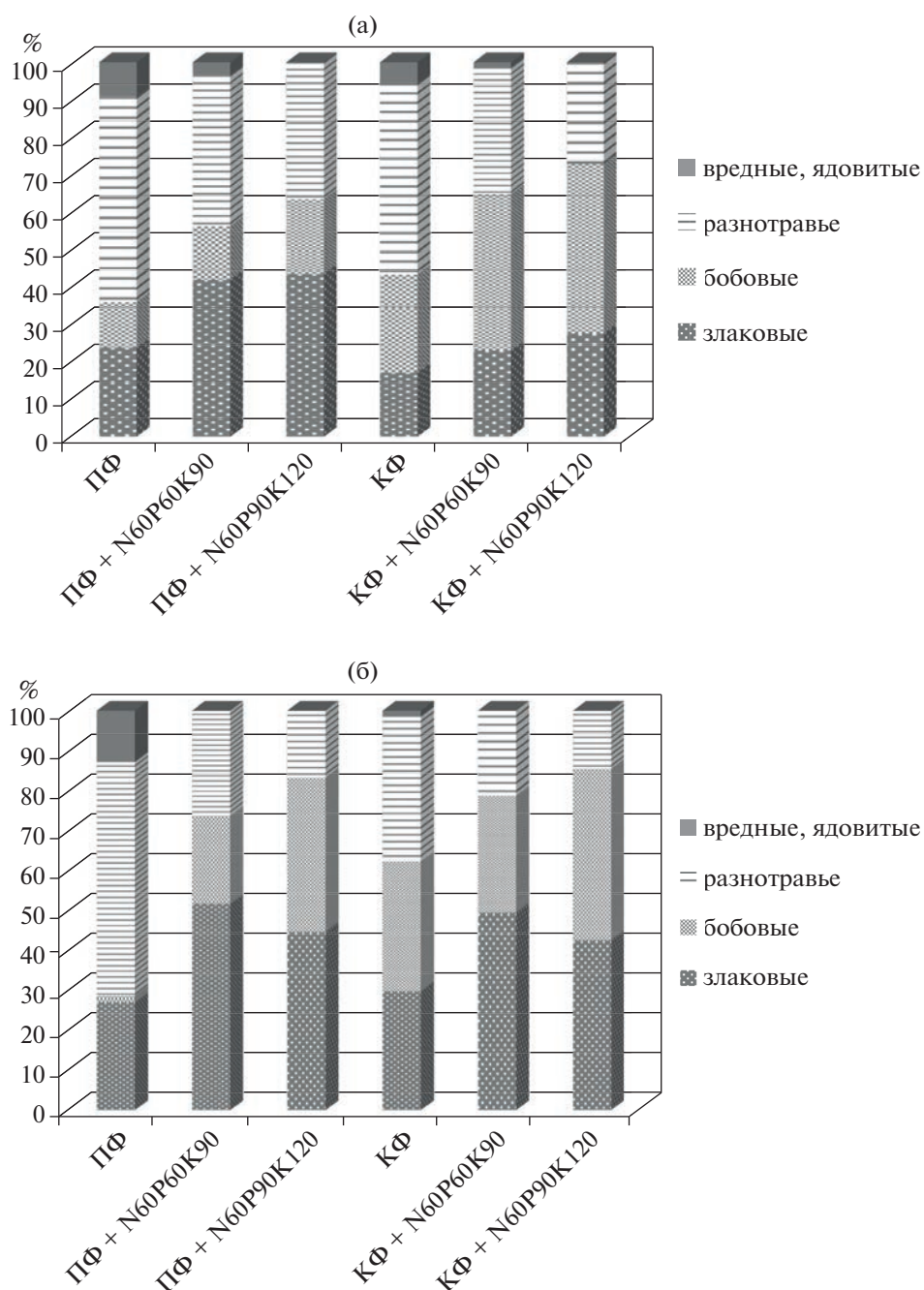
ла на 14.6% по сравнению с вариантами без подсева трав, которое было обусловлено улучшением фосфорно-калийного питания бобовых растений. В вариантах без удобрений и с внесением N60P90K120 травостой из-за наличия в нем вредных и ядовитых растений был непригоден для корма животных.

При определении ботанического состава травостоя 2-го года пользования выявлено преобладание злакового компонента над бобовым во всех вариантах природного фитоценоза (рис. 1б). В вариантах с неудобранным культурным фитоценозом и при внесении N60P90K120 в сочетании с подсевом соотношение злакового и бобового компонента было равно  $\approx 1 : 1$ . Это могло свидетельствовать о достаточном питании бобовых растений в этих вариантах. Сочетание подсева и применения минеральных удобрений способствовало снижению доли малоценного в кормовом отношении разнотравья в среднем в вариантах на 38% по сравнению с контролем.

При возделывании трав 3-го года пользования при благоприятных условиях увлажнения, не-

смотря на некоторое изреживание клевера, была получена наибольшая за годы наблюдений урожайность трав. Установлено преобладание в травостое злаковых растений в вариантах без удобрений и при внесении дозы N60P60K90 (рис. 1в), что, возможно, было связано с улучшением азотного питания злакового компонента травостоя за счет минерализации накопившихся корневых остатков и экссудатов бобовых трав. В вариантах с внесением N60P90K120 бобовые растения или доминировали, или ненамного уступали злаковым в количестве. Можно считать, что применение дозы удобрений N60P90K120 способствовало получению зеленого корма, сбалансированного по составу компонентов, т.е. по мере взросления травостоя при достаточном увлажнении оптимальной дозой удобрений трав являлась доза полного удобрения N60P90K120. Доля разнотравья в удобренных минеральными удобрениями вариантах снизилась в среднем на 30% по сравнению с вариантами без удобрений.

На 4-й год пользования, который характеризовался как острозасушливый, в ботаническом со-



**Рис. 1.** Влияние агробиотехнологических приемов на ботанический состав травостоя: (а) – 1-й г.п., (б) – 2-й г.п., (в) – 3-й г.п. (1-й укос), (г) – 4-й г.п.

стае травостоя в вариантах без подсева так же как и предыдущие годы доминировали злаки (рис. 1г). По мере улучшения минерального питания (вариант ПФ + N60P90K120) соотношение злаковых и бобовых растений почти выравнивалось. В вариантах с подсевом заметно возросла доля бобовых трав – в среднем на 32% по сравнению со злаками, доля разнотравья в этих вариантах снизилась на 34% по сравнению с

контролем и на 17% по сравнению с вариантами без подсева. В засушливых условиях и по мере взросления травостоя комбинация использованных агроприемов способствовала увеличению доли бобовых растений.

Химический состав кормовых растений в опыте зависел от наличия и доступности отдельных биогенных элементов в почве. Подсев и минеральные удобрения способствовали достоверно-

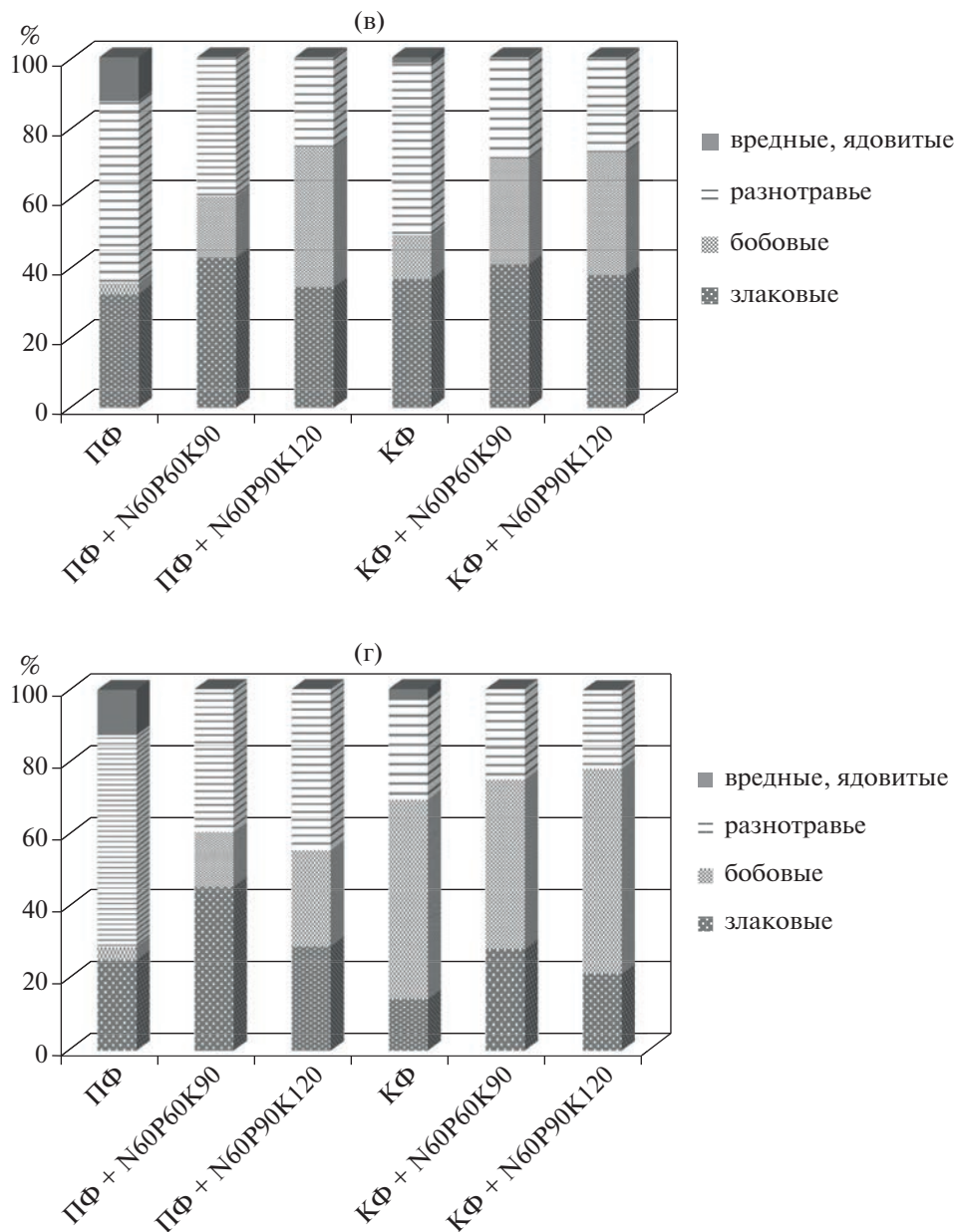


Рис. 1. Окончание.

му повышению в надземной массе трав содержания азота, фосфора и калия. Также установлена зависимость содержания фосфора и калия в растениях от условий увлажнения: в засушливые годы отмечено снижение в растениях содержания фосфора на 3–8% по сравнению со средними показателями в годы наблюдений, в вегетационные периоды с нормальным увлажнением содержание калия снижалось на 11–15%.

Применение агроприемов позволило повысить суммарную продуктивность травостоя, получить высококачественный корм (табл. 3). Еже-

годное внесение минеральных удобрений повысило продуктивность травостоя в среднем в опыте почти в 2 раза по сравнению с контролем. Сочетание подсева и внесения удобрений позволило увеличить продуктивность трав по сравнению с вариантами без подсева на 50–78%, а по сравнению с контролем – в 4.3–4.7 раза, что и повлияло также на величину чистого дохода в опыте. Наибольшая окупаемость 1 кг NPK, внесенных с удобрениями, 1 кормовой единицей, содержащейся в травах, получена также в вариантах с подсевом, этот показатель возрос почти в среднем в

**Таблица 3.** Агроэкономическая эффективность минеральных удобрений и подсева при выращивании многолетних трав

| Вариант                   | Выход с 1 га |                      |                            |            | Чистый доход,<br>тыс. руб./га | Окупаемость<br>1 кг NPK 1 к.е. |
|---------------------------|--------------|----------------------|----------------------------|------------|-------------------------------|--------------------------------|
|                           | ц к.е.       | сырой<br>протеин, кг | переваримый<br>протеин, кг | ОЭ, ГДж/га |                               |                                |
| Природный фитоценоз (ПФ)  |              |                      |                            |            |                               |                                |
| Без удобрений (контроль)  | 22.3         | 469                  | 239                        | 27.3       | −1.03                         | —                              |
| N60P60K90                 | 54.4         | 1109                 | 593                        | 66.3       | 5.06                          | 3.1                            |
| N60P90K120                | 69.4         | 1431                 | 750                        | 85.1       | 13.7                          | 3.5                            |
| Культурный фитоценоз (КФ) |              |                      |                            |            |                               |                                |
| Без удобрений             | 45.8         | 979                  | 583                        | 64.2       | 24.4                          | —                              |
| N60P60K90                 | 97.1         | 2060                 | 1250                       | 136        | 53.7                          | 7.1                            |
| N60P90K120                | 104          | 2190                 | 1310                       | 144        | 52.2                          | 6.0                            |

1.7–2.3 раза по сравнению с природным фитоценозом.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким, образом, анализ ботанического состава рекультивируемого сенокоса при использовании подсева семян трав и применения минеральных удобрений свидетельствовал об улучшении флористического состава угодья. В контрольном варианте без применения агроприемов тип сенокоса остался разнотравно-злаковый, присутствие в травостое вредных и ядовитых растений сделало невозможным использование травы для кормления животных. При использовании минеральных удобрений как без подсева, так и в сочетании с подсевом, был сформирован бобово-злаковый травостой, в котором в вариантах с применением N60P60K90 вредные и ядовитые растения исчезли, начиная со 2-го года пользования.

Внесение минеральных удобрений способствовало обогащению почвы доступными питательными веществами, что позволило повысить продуктивность трав в сочетании с подсевом в 2.0–4.7 раза, улучшить их качество за счет оптимизации ботанического состава травостоя.

Применение минеральных удобрений в дозах N60P60K90 и N60P90K120 в вариантах с природным и культурным фитоценозами обеспечивало увеличение доли ценных бобовых и злаковых трав, снижая долю разнотравья с 53 до 25–34%.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковшова В.Н. Экологические аспекты использования выработанных торфяников под луговыми фитоценозами // Сб. мат-лов Междунард. научн.-практ. конф., посвящ. 100-летию основания Ки-

ровской лугоболотной опытной станции “Многофункциональное адаптивное кормопроизводство”. ФНЦ “ВИК им. В.Р. Вильямса”, Кировская лугоболотная опытная станция, 2018. Вып. 18(66). С. 29–35.

2. Кланц Э. Сенокосы и пастбища. М.: Сельхозиздат, 1961. 615 с.
3. Рудаевская Н.Н. Ботанический состав сеяных фитоценозов // Вестн. ГАУ Северного Зауралья. 2016. №. 2. С. 76–80.
4. Кук Д.У. Регулирование плодородия почвы. М.: Колос, 1970. 520 с.
5. Мееровский А.С., Пастушок Р.Т., Бирюкович А.Л., Михайлова О.С. Технологический регламент производства зеленого корма и сырья для заготовки кормов на улучшенных сенокосах // Мелиорация. 2021. № 1(95). С. 31–37.
6. Ромашов П.И. Удобрение сенокосов и пастбищ. М.: Колос, 1969. 184 с.
7. Лепкович И.П. Современное луговое хозяйство. СПб.: Профи-Информ, 2005. 420 с.
8. Новоселов Ю.К. Методические указания по проведению полевых опытов с кормовыми культурами. М.: ВНИИ кормов им. В.Р. Вильямса, 2-е изд. 1997. 197 с.
9. Гусаков В.Г., Бречко Я.Н., Сумонов М.Е. Справочник нормативов трудовых и материальных затрат для ведения сельскохозяйственного производства. Минск: Белорус. наука, 2006. 709 с.
10. Сычев В.Г., Лепешкин В.В. Методические указания по оценке качества и питательности кормов. М.: МСХ РФ, ЦИНАО, 2002. 75 с.
11. Зворыкина О.Б., Бурцева Т.И., Васека К.Т. Агроклиматические ресурсы Владимирской области. М.–Ярославль: Верх.-Волж. кн. изд-во, 1968. 138 с.
12. Зотов А.А., Сабитов Г.А., Шукин Н.Н. Сенокосы и пастбища на торфяниках России. М.: Аверс Пресс, 2003. 435 с.

## **Transformation of the Botanical Composition of the Herbage with the Use of Mineral Fertilizers and Sowing Seeds on the Developed Peat Bog**

**T. Yu. Anisimova**

*All-Russian Research Institute of Organic Fertilizers and Peat – branch of the Upper Volga FASC  
ul. Pryanishnikova 2, d. Vyatkino, Sudogodsky district, Vladimir region 601390, Russia*

*E-mail: anistan2009@mail.ru*

The results of a 5-year study of changes in the botanical composition of seeded and natural herbage, soil properties depending on the applied agricultural techniques, which included direct sowing of grasses into the turf of the developed peat bog and the use of mineral fertilizers, are presented. The introduction of mineral fertilizers contributed to the enrichment of the soil with available nutrients, which made it possible to increase the productivity of herbs in combination with sowing by 2.0–4.7 times, to improve their quality by optimizing the botanical composition of the herbage. It was found that the use of mineral fertilizers in doses of N60P60K90 and N60P90K120 in variants with natural and cultural phytocenoses provided an increase in the proportion of valuable legumes and cereals, reducing the proportion of various grasses from 53 to 25–34%.

*Keywords:* mineral fertilizers, seeding, herbage, botanical composition, developed peat bog.

УДК 633.11:631.4:631.8:632.4

## ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ НА ПОЧВООБИТАЮЩИЕ МИКРОМИЦЕТЫ ЛУГОВОЙ ЧЕРНОЗЕМОВИДНОЙ ПОЧВЫ В ПОСЕВАХ ПШЕНИЦЫ

© 2023 г. Л. П. Шумилова<sup>1,\*</sup>, Е. В. Банецкая<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и природопользования ДВО РАН  
675000 Благовещенск, Амурская обл., пер. Рёлочный, 1, Россия

<sup>2</sup> Федеральный научный центр “Всероссийский научно-исследовательский институт сои”  
675027 Благовещенск, Амурская обл., Игнатьевское шоссе, 19, Россия

\*E-mail: Shumilova.85@mail.ru

Поступила в редакцию 03.02.2023 г.

После доработки 25.03.2023 г.

Принята к публикации 15.04.2023 г.

Впервые изучено влияние длительного систематического применения удобрений на микобиоту луговой черноземовидной почвы в стационарном полевом опыте (Амурская область). Приведены сведения о культивируемых почвенных микроскопических грибах, составлен аннотированный список, включающий 26 видов. Выявлено, что внесение азотных удобрений (N30) под пшеницу на фоне многолетнего применения удобрений вызывало увеличение общей численности почвенных грибов относительно контрольного варианта в среднем на 30–68%, тогда как при их последствии наблюдали менее значимое увеличение числа грибных зачатков (23–29%). Определены интервалы оптимального содержания макроэлементов для активного увеличения пула микроскопических грибов в луговой черноземовидной почве: фосфора – 50–65, калия – 195–210, азота –  $\geq 10$  мг/кг при оптимальной влажности почвы 22–24%. Последствие многолетнего применения удобрений, особенно органо-минеральных, как и внесение минеральных удобрений (N30) непосредственно в год исследования оказывали положительное влияние на видовое разнообразие, частоту встречаемости и динамику численности грибных зачатков в почве. Негативных перестроек микромикетных комплексов в результате длительного применения минеральных удобрений в агроценозах луговых черноземовидных почв не обнаружено, внесение азотно-фосфорных удобрений способствовало достоверному снижению пула фитопатогенных грибов.

**Ключевые слова:** микроскопические грибы, луговая черноземовидная почва, длительное применение удобрений, патогенная микофлора, пшеница.

**DOI:** 10.31857/S0002188123070104, **EDN:** OGGDBH

### ВВЕДЕНИЕ

Микроскопические грибы являются неотъемлемым структурным и функциональным компонентом окружающей среды и встречаются во всех биоценозах. В почвенных системах грибы участвуют в важнейших почвообразовательных процессах, таких как деструкция органических соединений и биохимическая трансформация минеральных элементов, продуцируют физиологически активные вещества, оказывающие стимулирующее или угнетающее влияние на жизненные процессы растений [1]. Именно грибы начинают разрушение таких стойких растительных и животных биополимеров как лигнин, клетчатка, хитин, способствуя тем самым повышению плодородия почв [2, 3]. При всей значимой роли микромикет-

тов в почвообразовательном процессе многие агрогенные факторы, к числу которых относится и длительное применение удобрений, могут приводить к трансформациям в структуре почвенных микромикетных комплексов, влиять на их численность, состав, активировать увеличение токсинопродуцирующих и фитопатогенных видов и др. [1, 4, 5]. Действие и последствие удобрений на сообщества микроскопических грибов до сих пор остаются малоизученным вопросом [6–9]. Анализ таксономического состава комплексов микроскопических грибов в почвах агросистем, учет полезной и патогенной микофлоры необходимы для обоснования оптимальной схемы внесения удобрений и повышения продуктивности агроценозов.

Таблица 1. Схема длительного стационарного опыта

| Год  | Культура                                       | Варианты                                                                                                       |            |                                      | Условное обозначение вариантов |
|------|------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|--------------------------------------|--------------------------------|
|      |                                                | многолетняя среднегодовая нагрузка удобрениями за ротацию на севооборотную площадь (кг/га – NPK, т/га – навоз) |            | внесено удобрений в год исследования |                                |
| 2014 | Пшеница сорта Арюна (3-я культура севооборота) | Без удобрений                                                                                                  | —          | —                                    | Контроль                       |
| 2016 |                                                | N24                                                                                                            | Низкая     | N30                                  | N + N30                        |
| 2021 |                                                | N24P30                                                                                                         | Средняя    | N30                                  | NP + N30                       |
|      |                                                | N24P30 + навоз 4.8                                                                                             | Повышенная | N30                                  | NP + навоз + N30               |
| 2017 | Пшеница сорта Арюна (5-я культура севооборота) | Без удобрений                                                                                                  | —          | —                                    | Контроль                       |
| 2018 |                                                | N24                                                                                                            | Низкая     | —                                    | N                              |
| 2021 |                                                | N24P30                                                                                                         | Средняя    | —                                    | NP                             |
|      |                                                | N24P30 + навоз 4.8                                                                                             | Повышенная | —                                    | NP + навоз                     |

Для агроценозов сельскохозяйственных регионов Дальнего Востока в целом недостаточно достоверной информации, отражающей особенности почвенного микробиома. В Амурской обл. сведения о почвенных микромицетных комплексах в почвах агроценозов также немногочисленны [10], что делает данные исследования особенно актуальными. Цель работы — установить влияние применения многолетней системы удобрения на микобиоту луговой черноземовидной почвы.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

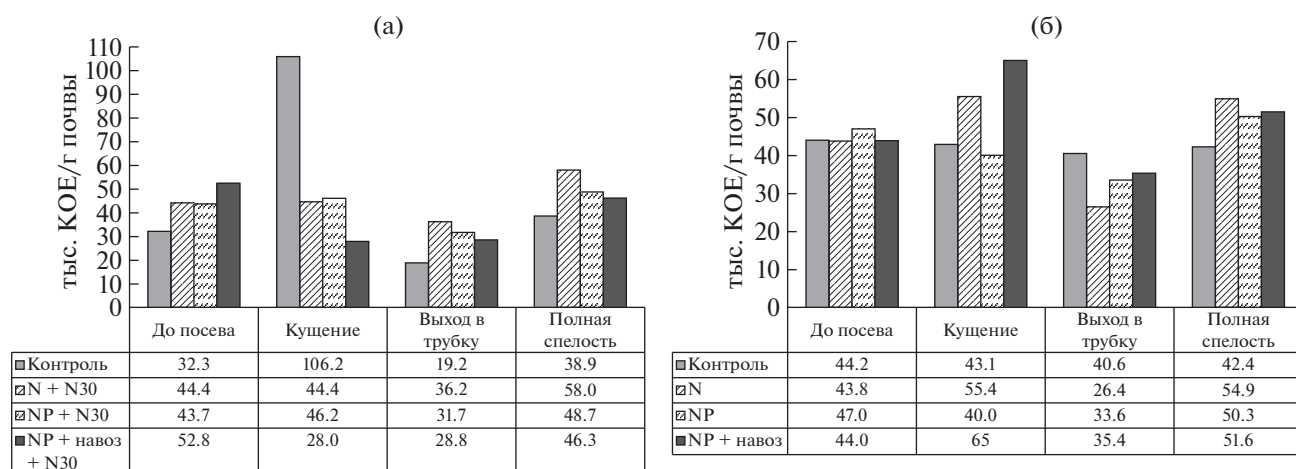
Исследование по влиянию длительного внесения удобрений на численность и таксономический состав микромицетов проводили в стационарном опыте ФНЦ ВНИИ сои, т.к. согласно [11], наиболее ценные и значимые результаты научных исследований получают в длительных стационарах на этапе приближения опытного участка к устойчивому экофитоценозическому равновесию. На этом этапе в условиях стационара аккумулируются во времени действие, взаимодействие и последствие агротехники, стрессовых природных условий и изучаемых факторов, что позволяет решать проблемы земледелия и экологии с учетом специфических для конкретной климатической зоны условий.

Стационарный опыт ФНЦ ВНИИ сои был заложен в 1962–1964 гг. в Тамбовском р-не Амурской обл. (с. Садовое, 50°21'07" с.ш. и 127°34'29" в.д.). Опыт входит в Географическую сеть опытов с удобрениями РФ (№ 039 реестра Геосети) и представляет собой 5-польный севооборот: овес — соя — пшеница — соя — пшеница. Исследованные варианты опыта с условными обозначениями представлены в табл. 1. Образцы почвы отбирали в 2017, 2018 и 2021 г. — в 5-м поле

севооборота из разных вариантов длительного применения удобрений N24, N24P30, N24P30 + + навоз (приведены согласно среднегодовой нагрузке удобрениями) и контроля (без удобрений); в 2014, 2016 и 2021 г. — в 3-м поле севооборота, когда под посев пшеницы на фоне длительного применения удобрений вносили дозу азотных удобрений (N30).

Для характеристики агрохимических свойств почв определяли:  $pH_{KCl}$  — потенциометрическим методом (ГОСТ 26483-85), содержание обменных кальция и магния — комплексонометрическим методом (ГОСТ 26487-85), подвижного фосфора и калия (по Кирсанову) — (ГОСТ 26207-91), обменного аммония — методом ЦИНАО (ГОСТ 26489-85), нитратного азота — методом ЦИНАО (ГОСТ 26951-86 Почвы), гумус — по методу Тюрина в модификации Пономаревой—Плотниковой [12].

Для микробиологического анализа отбор почвенного материала проводили по общепринятым в почвоведении методам [13] из горизонта A1 (2–10 см) в стерильные пакеты из крафт-бумаги, составляли средний почвенный образец из 3-х повторностей для каждого варианта. Выделение микроскопических грибов и определение их численности (в колониеобразующих единицах на г сухой почвы — КОЕ/г) проводили методом посева из серийных разведений на агаризованную подкисленную среду Чапека в семикратной повторности для каждого образца [14]. Идентификацию грибов осуществляли по культурально-морфологическим признакам в соответствии с определителями [10, 15–18]. Современные названия видов приводили в соответствии с базой данных CABI Bioscience Databases — <http://www.indexfungorum.org>. Оценку разнообразия комплек-



**Рис. 1.** Динамика численности микроскопических грибов под посевами пшеницы в течение вегетации: а – при прямом действии азотных удобрений (среднее за 2014, 2016, 2021 г.); б – при последствии удобрений (среднее за 2017, 2018, 2021 г.).

сов почвенных микромицетов проводили на основании пространственной частоты встречаемости и обилия видов [19]. Учет патогенных микроскопических грибов с корней и поврежденных стеблей пшеницы проводили методом накопления во влажных камерах [20]. Статистическую обработку данных проводили по [21]. Для аналитических расчетов использовали пакеты программ Microsoft Office.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Тип почвы стационара – луговая черноземовидная среднемощная. Этот тип почвы составляет основной фонд пашни Амурской обл. По агрохимическим показателям почва имеет слабокислую реакцию среды ( $\text{pH}_{\text{КСИ}}$  5.3–5.5), повышенную сумму поглощенных оснований (21.4–23.9 мг-экв/100 г почвы) с преобладанием ионов кальция. Глубина гумусового слоя (А+АВ) почвы составляет 20–30 см с содержанием гумуса до 3.6–4.3%. Валовые запасы азота достигают 0.3–0.5%, фосфора – 0.2–0.3% и калия 2.0–2.5%. При этом содержание минерального азота и подвижных форм фосфора очень низкое – 25–42 и 28–32 мг/кг почвы соответственно, а содержание калия, наоборот, очень высокое – до 170–240 мг/кг почвы [22].

*Численность микромицетов в луговой черноземовидной почве.* Анализ усредненных данных, полученных для вариантов с внесением азотных удобрений непосредственно в год отбора проб (пробы 3-го поля), показал, что в целом за вегетационный период численность микромицетов в луговой черноземовидной почве под посевами

пшеницы увеличивалась относительно контроля в среднем на 30–68% (рис. 1а), коэффициент вариации достигал 36%. Эффект от внесения азотных удобрений (N30) относительно контрольного варианта (без удобрений) проявился в увеличении численности грибных зачатков: до посева – на 11.4–20.5 тыс., в фазе выхода в трубку – на 9.6–17 тыс., к концу вегетации – на 7.4–19.1 тыс. КОЕ/г. Исключение составляли флуктуации численности КОЕ грибов контрольного варианта в фазе кущения и во всех вариантах в фазе выхода в трубку (конец июня–начало июля).

В посевах пшеницы, идущей 5-й культурой севооборота (влияние последствия удобрений), значимых изменений численности грибных зачатков в почве разных вариантов от контроля, за исключением всех вариантов периода выхода пшеницы в трубку, не выявлено (рис. 1б), коэффициент вариации – 18%. Количественные показатели грибных зачатков в почве до посева пшеницы среди исследованных вариантов различались незначительно – относительно контроля численность КОЕ увеличивалась на 0.4–2.8 тыс. (на 2.5%). Более значимое увеличение количества микромицетов (на 23–29%) относительно контрольного варианта отмечено в фазах кущения (на 12.3–21.9 тыс. КОЕ/г) и полной спелости (на 7.9–12.5 тыс. КОЕ/г). В эти фазы последствие минеральных и органо-минеральных удобрений стимулировало развитие грибных зачатков. В фазе выхода в трубку, как и при действии азотных удобрений, выявлена самая минимальная численность микромицетов – относительно контроля она снижалась на 21% (на 5.2–14.2 тыс. КОЕ/г).

**Таблица 2.** Коэффициенты парной корреляции численности микромицетов с содержанием макроэлементов и влажностью почвы

| Фаза роста и развития пшеницы                    | <i>n</i> | <i>r</i> <sub>крит</sub> | N <sub>мин</sub> (N-NH <sub>4</sub> + N-NO <sub>3</sub> ) | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | K <sub>2</sub> O | Влажность почвы |
|--------------------------------------------------|----------|--------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------|------------------|-----------------|
| 3-я культура севооборота (действие удобрений)    |          |                          |                                                           |                               |                  |                 |
| Кущение                                          | 8        | 0.71                     | –0.50                                                     | –0.34                         | –0.21            | –0.69           |
| Выход в трубку                                   | 8        | 0.71                     | –0.81                                                     | 0.36                          | –0.80*           | –0.93           |
| Полная спелость                                  | 12       | 0.58                     | –0.32                                                     | –0.09                         | 0.23             | –0.56           |
| Все фазы                                         | 28       | 0.37                     | –0.36                                                     | –0.10                         | 0.05             | –0.43           |
| 5-я культура севооборота (последствие удобрений) |          |                          |                                                           |                               |                  |                 |
| Кущение                                          | 12       | 0.58                     | 0.01                                                      | 0.21                          | 0.20             | 0.51            |
| Выход в трубку                                   | 12       | 0.58                     | 0.38                                                      | 0.10                          | 0.30             | 0.6             |
| Полная спелость                                  | 12       | 0.58                     | –0.73                                                     | –0.08                         | –0.31            | 0.74            |
| Все фазы                                         | 36       | 0.33                     | –0.11                                                     | 0.02                          | 0.06             | 0.49            |

Примечание. *n* — объем выборки, *r*<sub>крит</sub> — критическая величина коэффициента корреляции для уровня значимости *P*<sub>0.05</sub>.

Изменение численности микроорганизмов в почве носит характер флуктуаций или пульсаций, которые могут происходить в очень короткие промежутки времени и периодически повторяться [23, 24], чем можно объяснить и всплеск численности грибов (на 60–78.2 тыс. КОЕ/г) в фазе кушения пшеницы в контрольном варианте (рис. 1а). Но внесение удобрений, особенно минеральных (N, NP) по сравнению с органо-минеральными также способствовало росту численности грибов, которая возрастала к концу вегетации пшеницы.

Динамика численности почвенных микромицетов зависит не столько от вида удобрений, сроков и способа их внесения, сколько от воздействия сезонных экологических факторов, среди которых наиболее важным, лимитирующим развитие почвенной микрофлоры, является влажность почвы [25, 26]. Спад численности микромицетов, отмеченный в фазе выхода пшеницы в трубку как при внесении азотных удобрений, так и при их последствии (рис. 1а, б), мог быть обусловлен более высокими среднемесячными температурами при минимальном количестве выпавших осадков ( $\pm 20$  мм) в этот период. А увеличение количества грибов к периоду созревания культуры могло быть обусловлено началом сезона муссонных дождей в августе, когда средний гидро-термический коэффициент (ГТК) достигал 1.79.

В вариантах с внесением удобрений средняя влажность почвы составляла 25.4%, без внесения удобрений — 24.3%. При этом влажность удобренной почвы зачастую превышала 30%. В работах [25, 27] отмечена зависимость увеличения количества грибных зачатков от роста влажности

почвы, но до определенных пределов — при влажности почвы >30% их количество снижается. Полученные нами отрицательные коэффициенты корреляции числа КОЕ микромицетов с влажностью почвы при непосредственном внесении азотных удобрений и положительные при последствии длительного применения удобрений (табл. 2) подтвердили данное положение. Удобренная почва лучше сохраняла влагу, однако в годы с повышенным количеством осадков это приводило к переувлажнению. Наиболее благоприятные условия для развития почвенных грибов отмечены при влажности почвы в пределах 22–24%, что отражалось на их максимальной средней численности в данном диапазоне увлажнения — 84 тыс. КОЕ/г, тогда как в остальных интервалах влажности средняя численность КОЕ была существенно меньше — 33.4–58.5 тыс. КОЕ/г почвы (рис. 2).

Корреляционный анализ при прямом действии и последствии удобрений выявил наиболее сильную отрицательную взаимосвязь численности почвенных грибов с содержанием минерального азота в почве, особенно при внесении азотных удобрений (табл. 2). Полученные данные согласовались с данными работы [27], в которой показано, что при локальном внесении азотных удобрений комплекс почвенных грибов находился в репрессии, повышенное количество минерального азота в почве угнетало развитие микромицетов.

Анализ накопленного фактического материала о количестве микроскопических грибов в длительном стационарном опыте позволил установить оптимальное содержание макроэлементов,

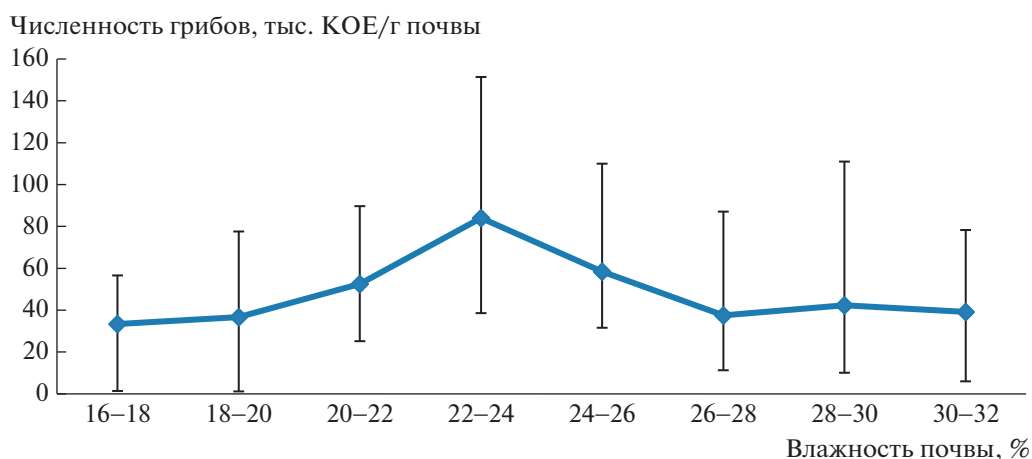


Рис. 2. Средняя численность микромицетов в зависимости от влажности почвы за все исследуемые годы.

способствующих активному развитию микромицетного комплекса в луговой черноземовидной почве (табл. 3). Наибольшая численность грибных зачатков отмечена при содержании в почве подвижных форм фосфора в пределах 50–65 и калия в пределах 195–210 мг/кг, тогда как минерального азота достаточно  $\leq 10$  мг/кг почвы, т.к. увеличение содержания азота приводило к снижению численности КОЕ микромицетов, что подтверждено и выявленной корреляционной зависимостью.

Таким образом, в луговой черноземовидной почве внесение азотных удобрений (N30) под пшеницу на фоне многолетнего применения минеральных и органо-минеральных удобрений вызывало увеличение численности КОЕ почвенных грибов относительно контрольного варианта (без удобрений) в среднем на 30–68%, тогда как при последствии многолетнего применения минеральных и органо-минеральных удобрений наблюдали менее значимое увеличение числа грибных зачатков (на 23–29%). Отмеченные в различных фазах развития пшеницы флуктуации численности микромицетов были связаны с резкими вариациями влажности почвы. Оптимальное содержание макроэлементов для активного увеличения пула микроскопических грибов в луговой черноземовидной почве составляло: фосфора – 50–65, калия – 195–210, азота –  $\leq 10$  мг/кг при оптимальной влажности почвы 22–24%.

**Таксономический состав микофлоры.** В качестве оценки состояния почв при длительном применении удобрений, помимо количественного учета, очень важно иметь представление о разнообразии микромицетов. Биоиндикационным показателем при антропогенном воздействии на почву может служить таксономический состав почвен-

ной микофлоры. Особенно важны сведения о видовом составе микромицетов, которые позволяют оценить фитосанитарное состояние почв, что особенно актуально для агроценозов.

Из луговой черноземовидной почвы опытных агроценозов с длительным применением удобрений было выделено 26 видов микроскопических грибов из 17 родов, без учета стерильного мицелия. Большинство (92%) выделенных видов – это анаморфные грибы из 5 порядков отдела Ascomycota: *Capnodiales*, *Eurotiales*, *Helotiales*, *Pleosporales* и самого многовидового *Hypocreales*. Отдел Zygomycota представлен 2-мя видами только одного порядка Mucorales, что составляло всего 8% от общего числа выделенных видов.

Таблица 3. Численность микроскопических грибов в зависимости от интервалов содержания макроэлементов в почве (на основании анализа 64 почвенных образцов)

| Минеральный азот (N-NH <sub>4</sub> + N-NO <sub>3</sub> ), мг/кг почвы |         |         |         |      |
|------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|------|
| ≤10                                                                    | 10–15   | 15–20   | 20–25   | >25  |
| тыс. КОЕ/г                                                             |         |         |         |      |
| 58.9                                                                   | 46.3    | 38.8    | 44.3    | 17.7 |
| Подвижный фосфор, мг/кг почвы                                          |         |         |         |      |
| ≤35                                                                    | 35–50   | 50–65   | 65–80   | >80  |
| тыс. КОЕ/г                                                             |         |         |         |      |
| 42.5                                                                   | 49.7    | 50.2    | 33.5    | 48.1 |
| Подвижный калий, мг/кг почвы                                           |         |         |         |      |
| ≤165                                                                   | 165–180 | 180–195 | 195–210 | >210 |
| тыс. КОЕ/г                                                             |         |         |         |      |
| 46.9                                                                   | 39.3    | 47.2    | 53.3    | 40.6 |

Самый многовидовой род *Penicillium* представлен 5-ю видами (табл. 4). Грибы этого рода обычно наиболее широко представлены в почвах и значительно преобладают в структуре микоценозов. Представители рода *Penicillium* встречались в каждом опытном варианте, наиболее обильно были представлены типичные *P. canescens* и *P. ochrochloron*. В вариантах с последствием удобрений частота встречаемости и обилие грибов этого рода значительно сократились. При антропогенных воздействиях и в отсутствие грибов-супрессоров среди представителей рода *Penicillium* могут встречаться виды-токсикообразователи, которые в качестве факультативных паразитов способны угнетать культурные растения. Среди выделенных на исследованных участках агроценоза видов р. *Penicillium* активные токсикообразователи не отмечены.

Второе место по количеству выделенных видов принадлежало грибам р. *Fusarium*, род насчитывал 4 вида. Самые распространенные — это *F. avenaceum* и *F. aquaeductuum*. Последний, согласно современной классификации (<http://www.species-fungorum.org>), переименован и относится к роду *Fusicolla*. Именно грибы из рода *Fusarium* представляют собой наиболее экономически значимую и широко распространенную группу фитопатогенных микромицетов, встречающихся в посевах зерновых культур. Все выделенные виды микромицетов р. *Fusarium* являются патогенами и могут вызывать фузариоз колоса или фузариозные корневые гнили [28, 29].

При длительном применении азотных удобрений по сравнению с контролем увеличилась частота встречаемости фитопатогенных *F. avenaceum* и *F. aquaeductuum*. При органо-минеральной системе удобрений грибы р. *Fusarium* встречались редко или случайно, но в этих же вариантах отмечено появление *F. graminearum*, который считается одним из наиболее вредоносных по отношению к пшенице. На фоне минеральной (NP) системы удобрения фитопатогенные грибы р. *Fusarium* тоже выпадали, что свидетельствовало о фитосанитарной роли комплексных (азотно-фосфорной и органо-минеральной) систем удобрения, способствующих уменьшению фитопатогенного пула грибов.

Род *Trichoderma* был представлен 3-мя видами: *Tr. koningii* встречалась повсеместно, *Tr. polysporum* отдавал предпочтение более удобренной почве, *Tr. sp.* — аллохтонный вид, привнесенный с навозом. Грибы этого рода считаются антагонистами фитопатогенной микофлоры, способными подавлять их развитие за счет продуцирования широкого спектра биохимически активных ве-

ществ [30]. Традиционно степень супрессивности почвы определяется наличием в ней грибов именно рода *Trichoderma*, поэтому представленное разнообразие грибов этого рода в исследованной почве агроценоза обуславливало ее супрессирующую активность.

Среди одновидовых родов грибы р. *Aspergillus* являются важным компонентом сельскохозяйственных почв, т.к. большинство представителей этого рода являются токсикообразующими. Выделяемые ими метаболиты зачастую оказывают ингибирующее воздействие на растения. В исследованных агроценозах представители этого рода встречались редко, преимущественно в контрольных вариантах и на фоне применения органо-минеральных (NP + навоз) удобрений. Низкая распространенность в пахотных почвах грибов р. *Aspergillus* обуславливала более благоприятное фитосанитарное состояние агроценозов.

Разнообразные мукоровые грибы обычно в почвах представлены достаточно широко, но в пахотных почвах, по мере усиления антропогенного воздействия их доля значительно снижается [31]. Из луговой черноземовидной почвы были выделены 2 вида мукоровых грибов — *Mucor plumbeus* и *Rhizopus stolonifera*, встречаемость которых в большей степени зависела от внесения удобрений в год исследования, чем от их последнего действия. *M. plumbeus* отмечен как редкий вид на фоне применения органо-минеральных удобрений, а частота встречаемости и обильность *R. stolonifer* увеличивались при использовании азотных и азотно-фосфорных удобрений.

При определенных условиях некоторые почвенные микромицеты способны переходить к факультативному паразитированию [32]. В исследованных агроценозах в составе микромицетных комплексов отмечены такие виды, которые считаются потенциальными возбудителями болезней растений. Обладая широкой филогенетической специализацией и способностью сохранения своей жизнеспособности при длительном нахождении в почве, они могут стать причиной различного рода заболеваний культурных растений. Состав консорциума патогенов в исследованных агроценозах дополняли такие факультативные паразиты как *Cladosporium cladosporioides*, *Cosmospora butyric* (ранее *Acremonium butyri* (J.F.H. Beyma) W. Gams), *Paramyrothecium roridum*, *Rhizopus stolonifer* и *Sarocladium strictum* (ранее *Acremonium strictum* W. Gams). Наряду с фитопатогенными в почве присутствовали также и грибы-супрессоры, способные снижать вредоносность фитопатогенных грибов. Помимо вышеупомянутой *Trichoderma* spp., к ним можно

**Таблица 4.** Видовое разнообразие и пространственная частота встречаемости микромицетов в луговой черноземовидной почве под пшеницей в агроценозах длительного стационарного опыта

| Вид микромицета                                                                 | Пространственная частота встречаемости |         |                 |                  |                          |   |                                       |            |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------|-----------------|------------------|--------------------------|---|---------------------------------------|------------|
|                                                                                 | 3-я культура севооборота               |         |                 |                  | 5-я культура севооборота |   |                                       |            |
|                                                                                 | Контроль                               | N + N30 | NP + N30        | NP + навоз + N30 | Контроль                 | N | NP                                    | NP + навоз |
| <i>Akanthomyces lecanii</i> (Zimm.) Spatafora, Kepler et B. Shrestha            | –                                      | P       | –               | –                | –                        | – | –                                     | –          |
| <i>Aspergillus ustus</i> (Bainier) Thom et Church                               | P                                      | –       | –               | –                | P                        | – | –                                     | P          |
| <i>Cladosporium cladosporioides</i> (Fresen.) G.A. de Vries                     | Д                                      | Ч       | Ч               | P                | Ч                        | Ч | Ч                                     | P          |
| <i>Clonostachys rosea</i> (Link) Schroers, Samuels, Seifert et W. Gams          | –                                      | –       | –               | P                | –                        | – | –                                     | –          |
| <i>Cosmospora butyri</i> (J.F.H. Beyma) Gräfenhan, Seifert et Schoers           | –                                      | –       | –               | Ч                | –                        | – | P                                     | P          |
| <i>Fusarium avenaceum</i> (Fr.) Sacc.                                           | P                                      | Ч       | –               | –                | P                        | Ч | –                                     | –          |
| <i>F. graminearum</i> Schwabe                                                   | –                                      | –       | –               | P                | –                        | – | –                                     | P          |
| <i>F. sp.</i>                                                                   | –                                      | –       | –               | C                | –                        | – | –                                     | –          |
| <i>Fusicolla aquaeductuum</i> (Radik. et Rabenh.) Gräfenhan, Seifert et Schoers | P                                      | Ч       | –               | –                | P                        | Ч | C                                     | P          |
| <i>Mucor plumbeus</i> Bonord.                                                   | –                                      | –       | –               | P                | –                        | – | –                                     | –          |
| <i>Oidiodendron griseum</i> Robak                                               | –                                      | P       | Ч               | –                | Ч                        | – | Ч                                     | –          |
| <i>Paramyrothecium roridum</i> (Tode) L. Lombard et Crous                       | P                                      | –       | –               | Ч                | –                        | – | –                                     | P          |
| <i>Penicillium canescens</i> Sopp                                               | Ч                                      | P       | Ч               | P                | Ч                        | – | Ч                                     | –          |
| <i>P. citrinum</i> Thom                                                         | Ч                                      | –       | –               | –                | –                        | – | –                                     | –          |
| <i>P. ochrochloron</i> Biourge                                                  | P                                      | P       | Ч               | P                | P                        | – | –                                     | Ч          |
| <i>P. restrictum</i> J.C. Gilman et E.V. Abbott                                 | –                                      | –       | –               | P                | –                        | – | –                                     | –          |
| <i>P. sp.</i>                                                                   | –                                      | –       | C               | P                | –                        | – | –                                     | –          |
| <i>Purpureocillium lilacinum</i> Luangsa-ard, Houbaken, Hywel-Jones et Samson   | Ч                                      | P       | –               | Ч                | Ч                        | P | P                                     | Ч          |
| <i>Rhizopus stolonifera</i> (Ehrenb.) Vuill.                                    | –                                      | Ч       | Ч               | –                | –                        | – | P                                     | P          |
| <i>Sarocladium strictum</i> (W. Gams) Summerb.                                  | –                                      | –       | –               | P                | –                        | Ч | –                                     | –          |
| <i>Talaromyces funiculosus</i> (Thom) Samson, N. Yilmaz, Frisvad et Seifert     | Ч                                      | Ч       | P               | P                | Д                        | Ч | P                                     | P          |
| <i>Torula sp.</i>                                                               | P                                      | –       | –               | P                | –                        | – | –                                     | Ч          |
| <i>Trichoderma koningii</i> Oudem.                                              | Д                                      | P       | Ч               | P                | Ч                        | Ч | –                                     | Ч          |
| <i>Tr. polysporum</i> (Link) Rifai                                              | –                                      | Ч       | P               | P                | P                        | – | –                                     | –          |
| <i>Tr. sp.</i>                                                                  | –                                      | –       | –               | C                | –                        | – | –                                     | C          |
| Общее количество выделенных видов                                               | 12                                     | 12      | 9               | 18               | 11                       | 7 | 8                                     | 13         |
| Индекс сходства Серенсена между вариантами                                      | Контроль – Контроль 0.8                |         | N + N30 – N 0.5 |                  | NP + N30 – NP 0.6        |   | NP + навоз + + N30 – NP + + навоз 0.6 |            |

Примечание. Прочерк – не выделен, C – случайные, P – редкие, Ч – частые, Д – доминирующие виды.

отнести *Akanthomyces lecanii* (ранее *Lecanicillium lecanii* (Zimm.) Zare et W. Gams), *Clonostachys rosea* (ранее *Gliocladium roseum* Bainier), многие виды *Mucor* и *Penicillium*.

В сельскохозяйственных почвах обычно очень часто встречаются грибы рода *Alternaria*, которые считаются одними из главных в спектре фитопатогенов и вызывают альтернариоз зерновых культур [33]. В структуре патокомплекса исследованных почв грибы этого рода не обнаружены. Но при фитопатологическом исследовании фрагментов вегетативных органов пшеницы, параллельно отобранных в фазе кушения, ассоциированные с растениями пшеницы изоляты в большинстве своем были представлены видами из рр. *Fusarium* и *Alternaria*.

К типичным представителям в исследованных агроценозах также можно отнести *Cladosporium cladosporioides*, *Purpureocillium lilacinum* (ранее *Paecilomyces lilacinus* (Thom) Samson) и *Talaromyces funiculosus* (ранее *Penicillium funiculosum* Thom). *P. lilacinum* чаще встречались в почвах контрольных участков и агроценозах с использованием органо-минеральных удобрений. *C. cladosporioides* был менее приурочен к вариантам, где применяли органо-минеральные удобрения, он встречался редко, возможно, сказалась конкуренция с привнесенными нетипичными видами. *T. funiculosus* — типичный представитель для почв дальневосточного региона [34], предпочтительнее развивался в почве контрольных участков и участков с применением азотных удобрений, в других вариантах был отмечен как редкий вид.

Видовое разнообразие оценивали по количеству выделенных видов в каждом варианте. Максимальное количество видов микроскопических грибов выделено в вариантах с применением органо-минеральных удобрений — 18 видов из 12 родов (вариант NP + навоз + N30) и 13 видов из 11 родов (вариант NP + навоз). Увеличение количества видов происходило при добавлении навоза, когда были привнесены аллохтонные виды — *Clonostachys rosea*, *F. sp.*, *Mucor plumbeus*, *Penicillium restrictum*, *Trichoderma sp.*

В почве контрольных вариантов количество выделенных видов оказалось несколько меньше: 12 видов из 10-ти родов (3-я пшеница) и 11 видов из 9-ти родов (5-я пшеница), так же как и в почве участков с длительным применением азотных и азотно-фосфорных удобрений. Самое минимальное количество выделенных видов отмечено в почве участков при последствии азотных и азотно-фосфорных удобрений. В целом в почве вариантов без внесения “свежих” удобрений ви-

довое разнообразие было меньше, чем в вариантах с непосредственным внесением удобрений. Внесение минеральных удобрений способствовало увеличению видового разнообразия в агроценозах.

Для сравнения степени таксономического сходства микромицетных сообществ в исследованных биоценозах рассчитывали индекс сходства Серенсена. Самое высокое сходство грибных сообществ выявлено между сообществами контрольных вариантов, индекс Серенсена составлял 0.8 (табл. 4), что свидетельствовало об однородности видовой структуры микромицетов в почве агроценозов без применения удобрений. Как внесение минеральных удобрений (N30) непосредственно в год отбора образцов, так и последствие их многолетнего применения (особенно органо-минеральных) оказывали положительное влияние на частоту встречаемости и видовое разнообразие микромицетов в почве агроценозов, о чем свидетельствовали средние величины индексов сходства между вариантами — 0.5–0.6.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, внесение азотных удобрений (N30) в луговую черноземовидную почву под пшеницу в севообороте на фоне многолетнего применения минеральных и органо-минеральных удобрений вызывало увеличение численности КОЕ почвенных грибов относительно контрольного варианта (без удобрений) в среднем на 30–68%, тогда как при последствии многолетнего применения удобрений наблюдали менее значимое увеличение числа грибных зачатков (на 23–29%). Выявленные в различных фазах развития пшеницы флуктуации численности микромицетов были связаны с резкими вариациями влажности почвы. Оптимальное содержание макроэлементов для активного увеличения пула микроскопических грибов в луговой черноземовидной почве составляло: фосфора — 50–65, калия — 195–210, азота — ≤10 мг/кг при оптимальной влажности почвы в пределах 22–24%. Последствие многолетнего применения удобрений, особенно органо-минеральных, как и внесение N30 оказывали положительное влияние на видовое обилие, частоту встречаемости и динамику численности грибных зачатков в почве.

Негативных перестроек микромицетных комплексов в результате длительного применения минеральных удобрений в агроценозах луговых черноземовидных почв не обнаружено — внесение азотно-фосфорных удобрений способствова-

ло достоверному снижению пула фитопатогенных грибов.

Выявленное высокое сходство грибных сообществ между сообществами контрольных вариантов (индекс сходства Серенсена 0.8) свидетельствовало об однородности видовой структуры микромицетов в почве агроценозов без применения удобрений. Увеличение таксономического разнообразия микромицетных сообществ в агроценозах с использованием разных вариантов удобрения (показатели индексов сходства составили 0.5–0.6) свидетельствовало о формировании устойчивых грибных комплексов, поддерживающих агроэкосистемы в состоянии экологического равновесия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марфенина О.Е. Антропогенная экология почвенных грибов. М.: Медицина для всех, 2005. 196 с.
2. Еремин Д.И., Попова О.Н. Агроэкологическая характеристика микромицетов, обитающих в почве // Вестн. ГАУ Северного Зауралья. 2016. № 1 (32). С. 12–18.
3. Черепухина И.В., Безлер Н.В., Громовик А.И. Биологическая активность чернозема выщелоченного при использовании соломы зерновых культур в качестве удобрения // Сб. научн. тр. ГНБС. 2019. Т. 148. С. 117–123.
4. Мирчинк Т.Г. Почвенная микология. М.: Изд-во МГУ, 1981. 208 с.
5. Degens B.P. Macro-aggregation of soils by biological bonding and binding mechanisms and the factors affecting these: a review // Austral. J. Soil Res. 1997. V. 35 (3). P. 431–460.
6. Стогниенко О.И., Шамин А.А. Влияние агротехники на почвенную и ризосферную биоту и распространенность микозов сахарной свеклы // Защита и карантин раст. 2014. № 8. С. 12–15.
7. Фаизова В.И., Цховребов В.С., Никифорова А.М., Новиков А.А., Марьян А.Н. Влияние сельскохозяйственного использования черноземов Центрального Предкавказья на численность и разнообразие микромицетов // Агрохим. вестн. 2017. № 4. С. 38–42.
8. Широких И.Г., Козлова Л.М., Широких А.А., Попов Ф.А., Товстик Е.В. Влияние способа обработки почвы и биопрепаратов на комплексы микромицетов в ризосфере и ризоплане яровой пшеницы // Почвоведение. 2017. № 7. С. 837–843.
9. Завьялова Н.Е., Широких И.Г., Ямалтдинова В.Р. Микробиологическое состояние дерново-подзолистой почвы Предуралья при длительном применении органических и минеральных удобрений // Теор. и прикл. экол. 2020. № 1. С. 151–159.
10. Егорова Л.Н. Почвенные грибы Дальнего Востока: гифомицеты. Л.: Наука, 1986. 192 с.
11. Сафонов А.Ф. Длительному полевому опыту ТСХА 90 лет: итоги научных исследований. М.: МСХА, 2002. 262 с.
12. Соколов А.В., Ильковская З.Г., Коновалов А.С. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
13. Кураков А.В. Методы выделения и характеристика комплексов микроскопических грибов наземных экосистем: учеб.-метод. пособ. М.: МАКС Пресс, 2001. 92 с.
14. Бабьева И.П., Зенова Г.М. Биология почв. М.: Изд-во МГУ, 1989. 249 с.
15. Raper K.B., Fennel D.I. The genus *Aspergillus*. Baltimore, 1965. 686 p.
16. Кириленко Т.С. Атлас родов почвенных грибов. Киев: Наукова думка, 1977. 126 с.
17. Domsch K.H., Gams W. Compendium of soil fungi. INW-Verlag, 2007. 672 p.
18. Шипилова Н.П., Иващенко В.Г. Систематика и диагностика грибов рода *Fusarium* на зерновых культурах. СПб., 2008. 84 с.
19. Мирчинк Т.М., Степанова Л.Н., Марфенина О.Е., Озерская С.М. Характеристика типа комплексов грибов микромицетов некоторых почв Советского Союза // Вестн. МГУ. Сер. Почвоведение. 1981. № 1. С. 35–39.
20. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Звягинцева Д.Г. М.: Изд-во МГУ, 1991. 303 с.
21. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
22. Банецкая Е.В. Влияние длительного применения удобрений на агрохимические свойства и микробценоз луговой черноземовидной почвы: Дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск, 2022. 177 с.
23. Рахно П.Х. Сезонная количественная динамика почвенных бактерий. Таллин, 1964. 235 с.
24. Kjoller A., Struwe S. Microfungi in ecosystems: fungal occurrence and activity in litter and soil // Oikos. 1982. V. 39. P. 389–422.
25. Рахно П., Аксель М., Сирп Л., Рийс Х. Динамика численности почвенных микроорганизмов и соединений азота в почве. Таллин: Изд-во Валгус, 1971. 207 с.
26. Аристовская Т.В. Микробиология процессов почвообразования. М.: Изд-во МГУ, 1972. 234 с.
27. Свистова И.Д., Стахурлова Л.Д., Щербаков А.П. Сукцессия микрофлоры чернозема в очаге локального внесения азотных удобрений // Агрохимия. 2003. № 3. С. 45–51.
28. Буга С.Ф., Артемова О.В., Радына А.А., Илюк А.Г., Бойко А.К. Видовой состав и вредоносность грибов рода *Fusarium*, вызывающих фузариоз колоса озимой пшеницы и ярового ячменя в условиях Беларуси // Микол. и фитопатол. 2005. № 5. С. 73–79.

29. *Торопова Е.Ю., Казакова О.А., Воробьева И.Г., Селюк М.П.* Фузариозные корневые гнили зерновых культур в Западной Сибири и Зауралье // *Защита и карантин раст.* 2013. № 9. С. 23–26.
30. *Harman G.E., Howell C.R., Viterbo A., Chet I., Lorito M.* *Trichoderma* species, opportunistic, avirulent plant symbionts // *Nat. Rev. Microbiol.* 2004. V. 2. I. 1. P. 43–56.
31. *Classen A.T., Boyle S.I., Haskins K.E.* Community-level physiological profiles of bacteria and fungi // *FEMS Microbiol. Ecol.* 2003. V. 44. I. 3. P. 319–328.
32. *Фундаментальная фитопатология* / Под ред. Ю.Т. Дьякова. М.: Красанд, 2012. 512 с.
33. *Зазимко М.И., Монастырский Э.И., Горьковенко В.С.* Патогенный комплекс на озимой пшенице // *Защита и карантин раст.* 2003. № 4. С. 18–21.
34. *Шумилова Л.П., Павлова Л.М.* Видовое разнообразие культивируемых микромицетов в буротаежных почвах северо-востока Амурской области // *Микол. и фитопатол.* 2020. Т. 54. №. 2. С. 124–133.

## Effect of Long-Term Use of Fertilizers on Soil-Dwelling Micromycetes of Meadow Chernozem Soil in Wheat Crops

**L. P. Shumilova<sup>a, #</sup> and E. V. Banetskaya<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> *Institute of Geology and Nature Management FEB RAS  
per. Relochny 1, Amur region, Blagoveshchensk 675000, Russia*

<sup>b</sup> *Federal Scientific Center, All-Russian Scientific Research Institute of Soybean  
Ignatievskoe shosse 19, Amur region, Blagoveshchensk 675027, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: Shumilova.85@mail.ru*

The effect of long-term systematic application of fertilizers on the mycobiota of meadow chernozem soil in a stationary field experiment (Amur region) was studied for the first time. Information about cultivated soil microscopic fungi is given, an annotated list including 26 species is compiled. It was revealed that the application of nitrogen fertilizers (N30) for wheat against the background of long-term use of fertilizers caused an increase in the total number of soil fungi relative to the control variant by an average of 30–68%, whereas with their aftereffect, a less significant increase in the number of mushroom germs was observed (23–29%). The intervals of the optimal content of macronutrients for the active increase of the pool of microscopic fungi in meadow chernozem soil were determined: phosphorus – 50–65, potassium – 195–210, nitrogen –  $\geq 10$  mg/kg with optimal soil moisture of 22–24%. The aftereffect of long-term application of fertilizers, especially organo-mineral fertilizers, as well as the application of mineral fertilizers (N30) directly in the year of the study had a positive effect on species diversity, frequency of occurrence and dynamics of the number of fungal germs in the soil. Negative rearrangements of micromycete complexes as a result of prolonged use of mineral fertilizers in the agrocenoses of meadow chernozem soils were not detected, the introduction of nitrogen-phosphorus fertilizers contributed to a significant decrease in the pool of phytopathogenic fungi.

**Keywords:** microscopic fungi, meadow chernozem-like soil, long-term use of fertilizers, pathogenic mycoflora, wheat.

УДК 632.952:631.98:633.1

## КОМПОЗИЦИИ ФУНГИЦИДОВ С РЕГУЛЯТОРАМИ РОСТА ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ РЕТАРДАНТНОГО ДЕЙСТВИЯ ПРОТРАВИТЕЛЕЙ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР

© 2023 г. О. В. Зорькина<sup>1</sup>, Е. А. Сухова<sup>2,3</sup>, О. О. Агапова<sup>3</sup>,  
Е. Э. Нефедьева<sup>2,3,\*</sup>, И. Р. Грибуст<sup>3</sup>, О. В. Колотова<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Волгоградский государственный университет  
40006 Волгоград, просп. Университетский, 10, Россия

<sup>2</sup> Волгоградский государственный технический университет  
400005 Волгоград просп. им. Ленина, 28, Россия

<sup>3</sup> Общество с ограниченной ответственностью «Агро Эксперт Групп»  
143421 Московская обл., Красногорский р-н, 26 км автодороги «Балтия»,  
п. Михалково, бизнес-центр «Рига Ленд», стр. 6, Россия

\*E-mail: nefedieva@rambler.ru

Поступила в редакцию 22.12.2022 г.

После доработки 24.02.2023 г.

Принята к публикации 15.04.2023 г.

Одной из причин снижения урожайности зерна является ретардантное действие фунгицидов. Кроме того, многие фунгициды оказывают токсигенное действие на мицелий гриба. Сочетание в комплексном препарате фунгицида и стимулятора роста растений может способствовать снижению уровня негативного действия пестицида. Предложено вводить в состав протравителей индивидуальные регуляторы роста и их сочетание в дозах 50, 100, 200 г/л протравителя. Длина и масса корня и побега проростков под влиянием протравителя были меньше, чем в контроле, а масса зерновки — больше. Под действием протравителя и гиббереллиновой кислоты длина побега соответствовала контролю, но его масса снизилась. Индолилмасляная кислота, добавленная к протравителю, способствовала эффективному потреблению запасных веществ зерновки и росту корня. Под влиянием протравителя и дифенилмочевины длина и масса побега значительно и сбалансированно увеличились. Композиция из протравителя и названных регуляторов роста в минимальных дозах наилучшим образом из всех вариантов повлияла на рост корня и побега. Следует отдать предпочтение низким дозам фитогормонов и их сочетанию.

**Ключевые слова:** пшеница *Triticum aestivum* L., гиббереллиновая кислота, индолилмасляная кислота, дифенилмочевина, салициловая кислота, имидазолы, стробилурины, триазолы.

**DOI:** 10.31857/S0002188123070128, **EDN:** OGINND

### ВВЕДЕНИЕ

Среди различных приемов, позволяющих защитить культуру от болезней, наиболее экономичным и экологически безопасным является протравливание [1].

Одной из причин возможного снижения урожайности зерна является ретардантное действие фунгицидов на длину coleoptilia и развитие всходов [2]. Препараты Скарлет (имазалил 100 г/л + тебуконазол 60 г/л), МЭ, 0.4 л/т, Поларис (прохлораз 100 г/л + имазалил 25 г/л + тебуконазол 25 г/л), МЭ, 1.5 л/т, Бенефис (имазалил 50 г/л + металаксил 40 г/л + тебуконазол 30 г/л), МЭ, 0.8 л/т, Кинто Дуо (триконазол 20 г/л + прохлораз 60 г/л), КС, 2.5 л/т и Иншур Перформ (триконазол 80 г/л + пираклостробин 40 г/л), КС,

0.6 л/т оказывали ретардантное действие на надземные органы проростков и рост первичных корней [2]. Ципроконазол тормозил рост побега, а флудиоксонил ингибировал рост только в высоких дозах, к 8-м сут прорастивания ингибирование роста проростков пшеницы прекращалось [3]. Ципроконазол обладает существенным подавляющим действием на всхожесть и рост побегов. Протиоконазол оказывает умеренное ретардантное действие. Наименьший ретардантный эффект на растения оказывает прохлораз. При выборе протравителя и разработке комбинированных препаратов следует учитывать возможный ретардантный эффект, зависящий от дозы протравителя [4].

Кроме ретардантного, многие фунгициды оказывают токсигенное действие на мицелий фитопатогенного гриба [5]. Применение фунгицидов

способствует торможению роста мицелия, но известно, что стробилурины способствуют выработке микотоксинов фитопатогенными грибами [6]. Карбендазим и пираклостробин способны ослаблять токсигенные свойства штамма *Fusarium oxysporum*. Смеси карбендазима и азоксистробина (1 : 3 и 3 : 3) снижали токсигенность штамма в меньшей степени, чем смеси карбендазима и пираклостробина (1 : 3 и 3 : 3) [5].

Сочетание в комплексном препарате фунгицида и стимулятора роста растений может способствовать снижению уровня негативного действия пестицида и повышению продуктивности растений [7]. Создание композиций на основе фунгицидов, регуляторов роста, микроэлементов, аминокислот и других компонентов, называемых защитно-стимулирующими составами — перспективный подход для комплексной защиты сельскохозяйственных культур [8]. Актуально применение сейфнеров (антидотов, индукторов устойчивости) при создании комплексных протравителей для обработки семян [9, 10].

В комплексной предпосевной обработке семян фунгицидом Винцит с выраженным ингибирующим влиянием на энергию прорастания и всхожесть семян, снижающим темпы роста корней и проростков, эпибрасинолид оказался эффективным для ускорения прорастания и увеличения всхожести семян, эместим — для стимулирования роста и накопления биомассы. При этом отмечена стабилизация содержания белков различных фракций [11]. Предложены композиции фунгицидов Дивиденд и Фенорам Супер с регуляторами роста растений Гуми-М или салициловой кислотой, характеризующихся четко выраженным ростстимулирующим и антистрессовым действием по отношению к воздействию неблагоприятных факторов среды разной природы, для снижения фитотоксичности химических средств защиты [7]. Доказана целесообразность применения регуляторов роста в баковых композициях с фунгицидами при обработке семян и растений для защиты растений пшеницы от болезней и повышения урожайности. Применение фунгицидов Дивиденд Экстрим КС и Альто Супер КЭ при сниженных нормах расхода в композициях с регуляторами роста Альбит и Авибиф позволило получить тот же эффект, как и использование химических препаратов в полной норме расхода. Данный прием может быть использован для снижения уровня пестицидной нагрузки на агроценоз пшеницы [12]. Включение в состав протравителей на основе тебуконазола, тирама [1] в качестве сейфнера 2-хлор-2-фтор-1-(5-(фуран-2-ил)-2,2-диметиллоксазолидин-3-ил)этанона (в виде смеси диастереомеров) — фурилазола-F1, а также известных антидотов (фурилазола, нафтаlevого

ангидрида) способствовало увеличению длины проростков и корневой системы по сравнению с контролем (водой) [13]. Нафтаlevый ангидрид и фурилазол, использованные в составе протравителей для снятия действия почвенных остатков гербицидов, сами могут быть фитотоксикантами, поэтому важно правильно выбирать их оптимальные дозы в протравителе [13]. Цель работы — выбор диапазона доз фитогормонов для включения в состав трехкомпонентного фунгицидного протравителя для семян с выраженными ретардантными свойствами для снижения негативного действия.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Использовали зерновки пшеницы сорта Авеста. Авеста® — сорт мягкой озимой пшеницы (*Triticum aestivum* L.), разновидность — лютесценс, полукарликовый, высота растения 65 см, устойчив к полеганию, среднеранний. Включен в Госреестр для Северо-Кавказского региона, вегетационный период — 226–278 сут, созревает в сроки, близкие к стандартному сорту Зерноградка 10. Засухоустойчивость сорта — на уровне стандарта, зимостойкость — выше средней, устойчив к весенним заморозкам. Масса 1000 зерен — 35–47 г, средняя урожайность в регионе — 47.0 ц/га. Сорт восприимчив к твердой головне, бурой ржавчине, септориозу, в полевых условиях мучнистой росой поражен средне.

Зерновки пшеницы обрабатывали протравителем с выраженными ретардантными свойствами, в состав которого входили представители имидазолов, стробилуринов, триазолов.

После обработки зерновок протравителем с физиологически активными добавками проводили определение лабораторной всхожести по ГОСТ 12038-84.

При учете энергии прорастания и всхожести отдельно подсчитывали нормально проросшие, набухшие, твердые, которые составили непроросшие семена и ненормально проросшие — невсхожие семена. За результат анализа принимали среднее арифметическое результатов определения всхожести всех проанализированных проб. Определяли длину корня и побега проростков и сухую массу побега, корня и зерновки проростка гравиметрическим методом.

Эксперименты проводили в четырехкратной повторности. Полученные результаты подвергали статистической обработке. Рассчитывали среднюю арифметическую ( $M$ ), среднее квадратическое отклонение ( $\delta$ ), ошибку репрезентативности средней арифметической ( $m_m$ ),  $t$ -критерий Стьюдента. Оценку достоверности разницы проводили с помощью сравнения полученной величины со стандартным  $t_{cm}$ .

Для предварительной оценки к протравителю (П+) в дозе 1 л/т добавляли гормоны в дозах 50, 100, 200 г/л протравителя (или 50, 100, 200 г/т). Использовали как индивидуальные гормоны, так и их сочетание (гиббереллиновая кислота — ГА, индолилмасляная кислота — ИМК, дифенилмочевина — ДФМ) в равных дозах 50, 100, 200 г/л (обозначено на рисунках Горм 50, 100, 200), а также в их сочетании с салициловой кислотой в равных дозах (обозначено на рисунках Горм + Ск 50, 100, 200). Параллельно исследовали влияние водных растворов сочетания фитогормонов (В+).

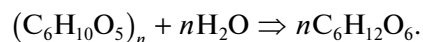
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Энергия прорастания и всхожесть практически не отличались. Под действием протравителя (рис. 1а) энергия прорастания уменьшилась на 12% относительно контроля. Положительное влияние оказали добавки ГА в концентрациях 50 и 100 г/л, ДФМ 100 и 200 г/л, салициловой кислоты 50 и 100 г/л и особенно ИМК 50 и 100 г/л.

Протравитель оказал существенное тормозящее влияние на рост проростков (рис. 1б). Фитогормоны способствовали росту корня (кроме салициловой кислоты) в сочетании с протравителем. Рост побега усилился под действием ГА 50 и ДФМ 50. ИМК и салициловая кислота не способствовали росту побега. Динамика изменения роста проростков указывала на то, что дозы гормонов 100 и 200 г/л протравителя явно избыточны, они способствовали торможению роста по сравнению с дозами 50 г/л протравителя. Иногда под действием ИМК наблюдали скручивание основания побега проростков. При совместном применении отмечен только эффект ингибирования роста при увеличении дозы, свидетельствующий о необходимости снижения количества гормонов. Водные растворы фитогормонов в дозах 50 г/л не оказали существенного влияния на рост проростков, а в более высоких дозах также ингибировали рост.

Для уточнения взаимоотношений между зерновкой как донором запасных питательных веществ и проростком как акцептором определяли изменение сухой массы частей проростка (4-е сут). Протравитель способствовал тому, что убыль массы зерновки и рост проростка замедлились (рис. 1в). Это явление может быть следствием нарушения межорганной сигнализации, в том числе гормональной. В целом масса проростка не изменилась, следовательно, на интенсивность дыхания (при котором происходит убыль сухого вещества) на данном этапе (4-е сут) протравитель влиял незначительно.

Увеличение массы зерновки под влиянием ГА 50 происходило за счет усиления гидролиза запасных веществ — это важнейшая функция гиббереллинов при прорастании семян [14]. В частности, при полном гидролизе крахмала в состав сухого вещества может включиться масса воды, составляющая 11.1% от массы крахмала:



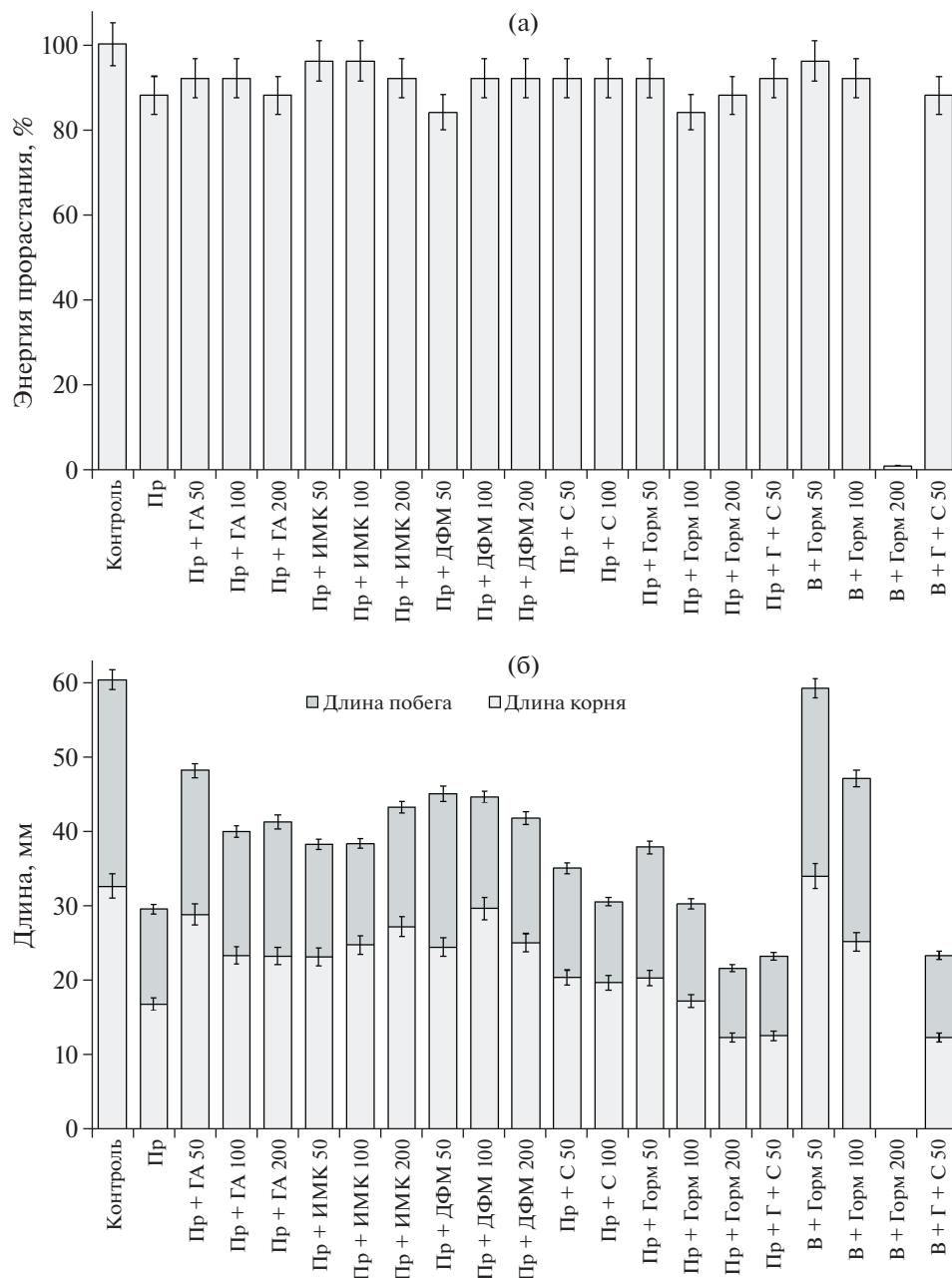
Помимо крахмала, гидролизу могут подвергаться другие полимерные вещества. Рост побега зародыша был несколько заторможен, потребление питательных веществ (и, возможно, дыхание) отставало от их образования. Такое явление нежелательно, могут происходить “перекорм”, торможение реакций гидролиза, дыхания, гликозилирование и разрушение важных белков. Все факты свидетельствовали о необходимости снижения дозы и применения дополнительных регуляторов роста. Более высокие дозы ГА нежелательны из-за замедления роста проростка.

ИМК 50, добавленная к протравителю, способствовала более эффективному потреблению питательных веществ и росту зародышевых органов по сравнению с протравителем, но показатели не изменились до уровня контроля. В частности, масса зерновки была достаточно высокой, т.к. ауксины также способствуют гидролизу запасных веществ. Более высокие дозы ИМК нежелательны, масса зерновки увеличивается, а усиления роста проростка не наблюдали.

ДФМ 50, добавленная к протравителю, также способствовала увеличению массы зерновки, при этом рост побега усиливался, но рост корня происходил медленнее, чем в контроле, но активнее, чем под влиянием протравителя. Применение более высоких доз не приводило к улучшению показателей.

Салициловая кислота активировала рост незначительно. Она выполняет функции защиты от инфекции и адаптогена. Высокие дозы салициловой кислоты (200 г/л) нежелательны для совместного применения с протравителем.

Совместное применение ГА, ДФМ, ИМК в дозе 50 г/л способствовало более эффективной утилизации запасных питательных веществ, чем под влиянием протравителя, но существенно не повлияло на рост проростка. Водный раствор этих гормонов в дозе 50 г/л способствовал усилению гидролиза питательных веществ; их отток и рост проростка примерно соответствовали контролю. Применение более высоких доз гормонов было нецелесообразным. Добавка салициловой кислоты способствовала замедлению оттока веществ из зерновки, но приводила и к накоплению массы



**Рис. 1.** Влияние фитогормонов и протравителя (Пр) на: (а) – энергию прорастания, (б) – длину проростков, (в) – массу частей проростков (4-е сут) пшеницы сорта Авеста.

проростка. Длина проростка была меньше, чем в контроле и других вариантах опыта. Формировались укороченные коренастые проростки, такой габитус обычно свидетельствует о высокой устойчивости растений к неблагоприятным факторам среды. Однако визуально это явление нежелательно. Следует уменьшать дозы гормонов, отдавая предпочтение не отдельным гормонам, а их сочетанию.

Через 8 сут длина корня и побега проростка, а также их масса (рис. 2) под влиянием протравите-

ля были меньше, чем в контроле. Масса зерновки была больше, чем в контроле, несмотря на то что к 8-м сут полностью формировался фотосинтетический аппарат, и запасные вещества зерновки почти полностью расходовались и переставали быть главным источником питания. Масса целого проростка под влиянием протравителя была меньше, чем в контроле. Следовательно, в проростках усилилось дыхание [15], причем в основном в зародышевых органах проростка. Эти факты указывают на развитие стресса.

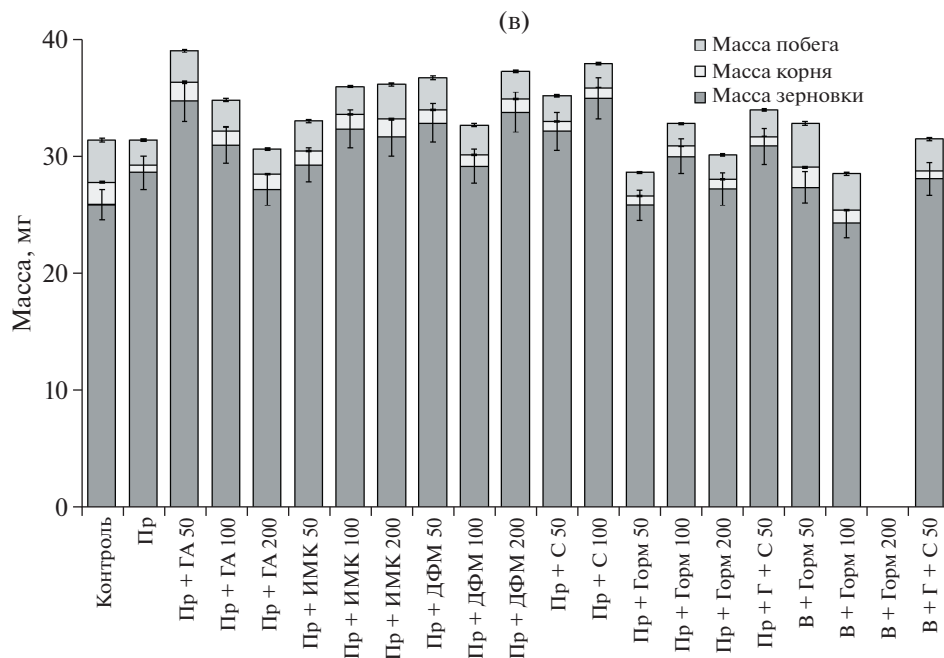


Рис. 1. Окончание.

Под влиянием протравителя и ГА длина побега во всех вариантах (8-е сут) практически соответствовала контролю, но масса побега была меньше, проростки вытягивались в длину, выглядели несколько субтильно. Длина и масса корня соответствовали варианту с обработкой протравителем, ГА не оказал влияния на рост корня. Запасные вещества зерновки расходовались несколько более значительно, чем в варианте с обработкой протравителем. Увеличение дозы ГА от 50 до 200 г/л было нецелесообразным.

Под влиянием протравителя и ИМК длина и масса побега во всех вариантах (8-е сут) были больше, чем в варианте с обработкой протравителем, но меньше контроля. ИМК незначительно способствовала росту корня, а также расходованию питательных веществ из зерновки.

Под влиянием протравителя и ДФМ длина и масса побега во всех вариантах (8-е сут) значительно и сбалансированно увеличились. ДФМ незначительно способствовала росту корня и не влияла на расход питательных веществ из зерновки.

Под влиянием протравителя и салициловой кислоты также несколько увеличились длина и масса побега. Салициловая кислота не повлияла на рост корня и на расход питательных веществ из зерновки.

Композиция из ГА, ИМК, ДФМ 50 и протравителя наилучшим образом из всех вариантов повлияла на рост корня. Рост побега в длину и его масса также были больше, чем в варианте с обработкой

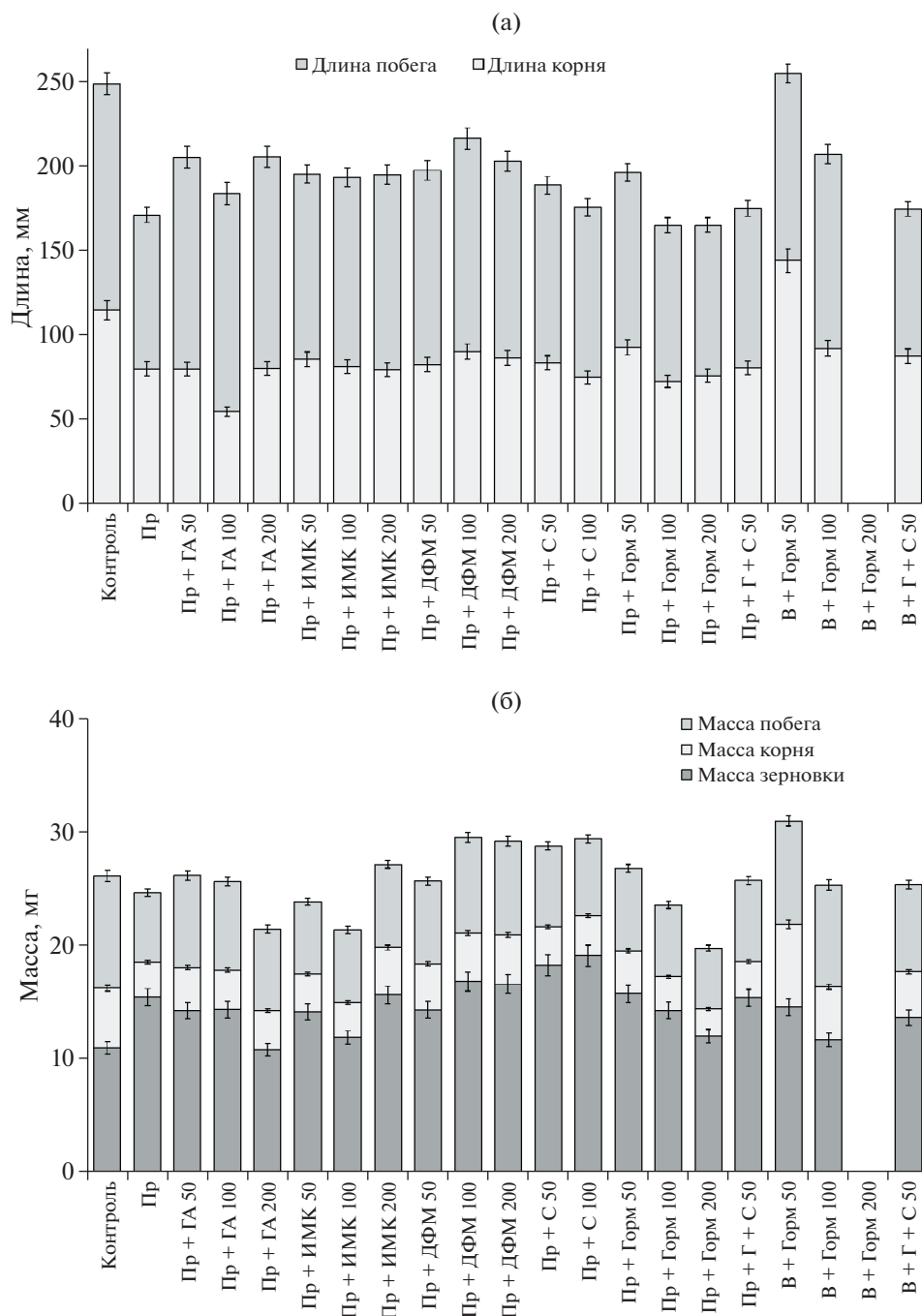
протравителем. Увеличение дозы гормонов способствовало более полному исчерпанию запасных питательных веществ зерновки, но не оказало желательного стимулирующего влияния на рост.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фунгициды, рекомендованные для применения в сельском хозяйстве, способны сами оказывать ретардантное действие, а также способствовать выработке фитотоксинов фитопатогенными грибами, присутствующими в растении. Длина и масса корня и побега проростков под влиянием протравителя были меньше, чем в контроле, а масса зерновки — больше, что указывает на нарушение утилизации запасных веществ зерновки.

Введение в состав комплексного препарата индивидуальных регуляторов роста — ГА, ИМК, ДФМ, салициловой кислоты и их сочетаний в дозах 50, 100, 200 г/л протравителя способствовало снижению уровня негативного действия пестицида.

Под действием протравителя и ГА длина побега соответствовала контролю, но его масса снизилась. ИМК, добавленная к протравителю, способствовала эффективному потреблению запасных веществ зерновки и росту корня. Под влиянием протравителя и ДФМ длина и масса побега значительно и сбалансированно увеличились. Композиция из протравителя и ГА, ИМК, ДФМ в минимальных дозах наилучшим образом из всех вариантов повлияла на рост корня и побега.



**Рис. 2.** Влияние фитогормонов и протравителя на: (а) — длину проростков, (б) — массу частей проростков (8-е сут) пшеницы сорта Авеста.

Применение фитогормонов в высоких дозах представляет определенный риск. Большинство гормонов обладают полимодальным действием, их влияние может быть как стимулирующим, так и ингибирующим в зависимости от дозы. Семена разного вида, сорта, класса и жизнеспособности неодинаково реагируют на одни и те же дозы фитогормонов. Следует отдать предпочтение низким дозам фитогормонов и их сочетанию. Зада-

чей следующего этапа исследований должно стать изучение влияния на прорастание зерновок меньших доз фитогормонов и их сочетаний в составе протравителей.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долженко В.И., Котикова Г.Ш., Здрожевская С.Д., Гришечкина Л.Д., Буркова Л.А., Герасимова А.В., Силаев А.И., Милютенкова Т.И., Белых Е.Б. Про-

- травливание семенного материала: рекомендации. М. СПб.: Изд-во Агрорус, 2003. 61 с.
2. Порсев И.Н., Торопова Е.Ю., Малинников А.А. Эффективность протравителей семян в ограничении корневых гнилей яровой пшеницы // Защита и карантин раст. 2016. № 2. С. 24–25.
  3. Неведьева Е.Э., Зорькина О.В., Гераськин С.А., Белопухов С.Л. Влияние различных соотношений азоксистробина, протиоконазола и прохлораза на токсигенные свойства фитопатогенных грибов // Бутлеровские сообщ. 2021. Т. 65. № 1. С. 98–104.
  4. Байбакова Е.В., Неведьева Е.Э., Белопухов С.Л. Исследование влияния современных протравителей на всхожесть и рост проростков зерновых культур // Изв. вузов. Прикл. хим. и биотехнол. 2016. Т. 6. № 3 (18). С. 57–64.
  5. Байбакова Е.В., Неведьева Е.Э., Белицкая М.Н., Грибуст И.Р., Косогорина М.Д., Севрюкова Г.А. Influence of fungicides on toxigenic properties of phytopathogenic fungi // BIO Web of Conf. 2020. Т. 23. С. 6.
  6. Ellner F.M. Results of long-term field studies into the effect of strobilurin containing fungicides on the production of mycotoxins in several winter wheat varieties // Mycotoxin Res. 2005. № 21. P. 112–115.
  7. Исаев Р.Ф., Шакирова Ф.М., Безрукова М.В., Сахабудинова А.Р., Фатхутдинова Р.А., Авальбаев А.М., Аллагулова Ч.Р., Гулязетдинов Ш.Я., Масленникова Д.Р. Использование композиций фунгицидов с регуляторами роста для повышения продуктивности пшеницы // Аграрн. наука. 2005. № 4. С. 26–27.
  8. Тютеев С.Л. Научные основы индуцированной болезнестойчивости растений. СПб., 2002. 328 с.
  9. Халиков С.С., Голубев А.С., Коротов Н.А., Чкаников Н.Д., Спиридонов Ю.Я. Инновационные протравители с антидотным действием // Агрохимия. 2017. № 4. С. 22–25.
  10. Голубев А.С., Коротов Н.А., Федоровский О.Ю., Спиридонов Ю.Я., Чкаников Н.Д. Фторсодержащие аналоги промышленного антидота фурилазол // Агрохимия. 2017. № 6. С. 62–67.
  11. Богуславская Н.В. Способы снижения фитотоксического действия фунгицидов на ранних этапах онтогенеза ячменя (снижение фитотоксичности винцита с помощью регуляторов роста Эмистим С и эпибрасинолида) // Экол. безопасность в АПК. Реферат. журн. 2009. № 3. С. 756.
  12. Дубровская Н.Н. Эффективность баковых композиций фунгицидов и регуляторов роста на яровой пшенице // Международный. научн.-исслед. журн. 2013. № 9–2(16). С. 6–7.
  13. Спиридонов Ю.Я., Чичварина О.А., Голубев А.С., Чкаников Н.Д., Халиков С.С. Инновационные протравители с антидотным действием. Изучение антистрессового действия фурилазола и его производного // Агрохимия. 2018. № 4. С. 45–49.
  14. Неведьева Е.Э., Белопухов С.Л., Верхотуров В.В., Лысак В.И. Роль фитогормонов в регуляции прорастания // Изв. вузов. Прикл. хим. и биотехнол. 2013. № 1. С. 61–66.
  15. Байбакова Е.В., Неведьева Е.Э. Изменения интенсивности дыхания проростков пшеницы под действием азоксистробина и регулятора роста // Вестн. науки и образ-я. 2017. № 12(36). С. 29–32.

## Compositions of Fungicides with Growth Regulators which Reduce the Retarding Effect of Crop Protectants

O. V. Zorkina<sup>a</sup>, E. A. Sukhova<sup>b,c</sup>, O. O. Agapova<sup>c</sup>, E. E. Nefedieva<sup>b,c,#</sup>,  
I. R. Gribust<sup>c</sup>, and O. V. Kolotova<sup>b,c</sup>

<sup>a</sup> Volgograd State University  
Universitetskiy prosp. 10, Volgograd 400006, Russia

<sup>b</sup> Volgograd State Technical University  
prosp. Lenina 28, Volgograd 400005, Russia

<sup>c</sup> Agro Expert Group Limited Liability Company Riga Land Business Center  
bld. 6, Moscow Region, Krasnogorsky district, d. Mikhalkovo 143421, Russia

<sup>#</sup> E-mail: nefedieva@rambler.ru

One of the reasons for the decrease in the yield of crops is the retardant effect of fungicides. In addition, many fungicides have a toxigenic effect on the mycelium of the fungus. The combination of a fungicide and a plant growth stimulant in a complex preparation can help to reduce the level of the negative effect of the pesticide. It is proposed to introduce individual growth regulators and their combination into the composition of the seed protectant in doses of 50, 100, 200 g/l. The length and the weight of the root and shoot of seedlings under the influence of the seed protectant were less than in the control, and the weight of the endosperm of grain was greater. Under the influence of the seed protectant and gibberellic acid, the length of the shoots corresponded to the control, but their weight was decreased. Indolylbutyric acid, added to the seed protectant, contributed to the effective consumption of spare substances of the endosperm of grain and root growth. Under the influence of the protectant and diphenylurea, the length and the weight of the shoot increased significantly in a balanced manner. The composition of the protectant and the named growth regulators in minimal doses affected the growth of the roots and shoots in the best way of all variants. Preference should be given to low doses of phytohormones and their combination.

**Keywords:** *Triticum aestivum* L., gibberellic acid, indolyl butyric acid, diphenylurea, salicylic acid, imidazoles, strobilurines, triazoles.

УДК 631.417.1:631.631.51:631.445.41(470.40/.43)

## ОЦЕНКА ЭМИССИИ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ И ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА ПРИ НУЛЕВОЙ ОБРАБОТКЕ ЧЕРНОЗЕМА В УСЛОВИЯХ ЛЕСОСТЕПНОЙ ЗОНЫ СРЕДНЕГО ПОВОЛЖЬЯ<sup>1</sup>

© 2023 г. Л. В. Орлова<sup>1,\*</sup>, Н. М. Троц<sup>2</sup>, В. И. Платонов<sup>3</sup>, Е. В. Балашов<sup>4</sup>, С. В. Сушко<sup>4</sup>, И. Н. Колесниченко<sup>3</sup>, С. В. Орлов<sup>5</sup>, Е. В. Круглов<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Национальное движение сберегающего земледелия  
443099 Самара, ул. Куйбышева, 88, Россия

<sup>2</sup> Самарский государственный аграрный университет  
446442 Кинель, п.г.т. Усть-Кинельский, ул. Учебная, д. 2, Россия

<sup>3</sup> Самарский национальный исследовательский университет им. акад. С.П. Королева  
443086 Самара ул. Московское шоссе, 34, Россия

<sup>4</sup> Агрофизический институт  
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия

<sup>5</sup> ООО “Орловка-Агро-Инновационный Центр”  
446472 Самарская обл., Похвистневский р-н, с. Старый Аманак, ул. Центральная, 42 Е, Россия

<sup>6</sup> Самарский государственный медицинский университет Минздрава РФ  
443079 Самара, ул. Гагарина, 20, Россия

\*E-mail: orlova.rmrl@gmail.com

Поступила в редакцию 18.09.2022 г.

После доработки 29.03.2023 г.

Принята к публикации 15.04.2023 г.

Переход от общепринятой технологии обработки почв к технологии нулевой обработки способствует увеличению секвестрации углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) в форме углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) из атмосферы в почву и, как следствие, снижению неблагоприятных воздействий парникового эффекта на экологическое состояние окружающей среды. Эффективность применения нулевой обработки почв в большей или меньшей степени обусловлена конкретными агроклиматическими условиями, системами севооборотов, удобрения и защиты растений, качеством и устойчивостью почв. Исследовали влияние нулевой обработки почвы на динамику запасов  $C_{\text{орг}}$  и эмиссию парниковых газов ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ) в агроклиматических условиях растениеводческого хозяйства (ООО “Орловка АИЦ”, Самарская обл.). Исследование провели на агрочерноземе тяжелосуглинистом в сентябре–ноябре 2021 г. в условиях аномально засушливого вегетационного периода и высоких летних температур. На участках с нулевой обработкой почвы поступило с растительными остатками: 268–1721 кг С/га, 3–66 кг N, 0.2–7.7 кг Р и 12–44 кг К/га. На основе полученных результатов предложены рекомендации по дальнейшему совершенствованию эффективности технологии нулевой обработки почвы благодаря, во-первых, уменьшению ее неблагоприятного влияния на плотность сложения почвы, и, во-вторых, учету влияния подстилающих материнских пород и рельефа на водную эрозию почвы и перераспределение гранулометрических фракций почвы в агроландшафте, что позволит применять эту технологию согласно принципам адаптивно-ландшафтного земледелия.

**Ключевые слова:** природоохранное ресурсосберегающее земледелие, нулевая и общепринятая обработка почвы, свойства почвы, секвестрация углерода, эмиссия парниковых газов.

**DOI:** 10.31857/S0002188123070086, **EDN:** OFWSES

### ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях изменяющегося климата сохранение оптимальных запасов органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) в почвах является сложной задачей в связи с увеличением частоты рисков

возникновения неблагоприятных погодных явлений (засухи, пыльных бурь, ливней) и поэтому с проблемой выбора рациональных систем земледелия. При благоприятных агроклиматических условиях длительно применяемые, почвозащитные системы земледелия характеризуются устойчивыми запасами  $C_{\text{орг}}$  в почвах. Однако при переходе от одной системы земледелия к другой или

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке АО “ОХК “УРАЛХИМ”.

при изменении способа сельскохозяйственного использования земель секвестрация  $C_{орг}$  в почвах может существенно изменяться. За последние 2 столетия глобальные потери  $C_{орг}$  из почв составили ~8% только в результате переустройства земель и неэффективных методов землепользования [1]. Подобное уменьшение запасов  $C_{орг}$  в почвах приводит к снижению их качества и устойчивости к естественным и антропогенным воздействиям. Кроме того, более интенсивная обработка почвы приводит увеличению выбросов углекислого газа ( $CO_2$ ) в атмосферу, что может способствовать усилению парникового эффекта и глобального потенциала потепления климата [2–4]. В связи с этим необходимы дальнейшее совершенствование применяемых и разработка новых систем земледелия и обработки почв, способствующих снижению выбросов парниковых газов и повышению запасов  $C_{орг}$  в почвах посредством управления секвестрацией углерода из атмосферы в почвы [5–10].

В настоящее время в мире все шире распространяются технологии природоохранного ресурсосберегающего земледелия (ПРЗ), которые включают минимальную или нулевую обработку почв и расширенное применение биологических методов, способствующих секвестрации и депонированию  $C_{орг}$  в почвах. Согласно расчетам, глобальный потенциал секвестрации  $C_{орг}$  в почвах может достигнуть  $0.9 \pm 0.3$  Гт С/га/год [11]. Однако этот потенциал во многом обусловлен климатическими условиями, системами земледелия, генезисом почв и их физическим, физико-химическим и микробиологическим состоянием.

Длительное применение общепринятой вспашки с полным оборотом пласта может привести к эрозионным потерям илистой фракции почв и гумуса, и, как следствие, к ухудшению физического состояния почв [11–15]. Переход от общепринятой к нулевой (**no-till**) обработке рассматривается как один из рациональных и эффективных способов повышения секвестрации и запасов  $C_{орг}$  в почвах, сохранения илистой фракции почв и улучшения их физического и биологического состояния [16–22].

Благоприятное влияние нулевой обработки на содержание органического вещества проявляется в секвестрации и закреплении углерода в почвах [10, 23–26]. Результаты ряда исследований показали, что после длительного применения (от 5-ти до 23-х лет) нулевой обработки секвестрация органического углерода в слое 0–60 см почвы варьировала от 20.3 до 22.8 т/га [27]. В ряде работ подтверждено благоприятное влияние нулевой обработки почвы на изменение содержания ее органического вещества для разных подтипов

черноземов в таких регионах как Ростовская, Курская и Курганская обл., Ставропольский и Красноярский край [28–33]. Причем эти исследования выполнены как в условиях полевых модельных экспериментов, так и на производственных полях агрохозяйств, которые успешно реализуют данную ресурсосберегающую технологию на протяжении 4–12 лет.

Однако применение нулевой обработки почв может, особенно на первых этапах ее использования, приводить к повышению плотности сложения почв, уменьшению объема пор аэрации и к формированию анаэробных условий, которые будут способствовать увеличению интенсивности формирования и эмиссии закиси азота ( $N_2O$ ) вследствие усиления микробиологического процесса денитрификации [34–40].

К настоящему времени выявлено множество благоприятных изменений свойств почв после применения нулевой обработки, проявляющихся не только в вышеупомянутом повышении содержания  $C_{орг}$ , но и в улучшении агрегатного состояния почв [25, 33], увеличении ферментативной активности, группового и функционального разнообразия почвенных микроорганизмов и мезофауны [29–31].

Большинство исследований влияния нулевой обработки почв на эмиссию парниковых газов посвящено секвестрации атмосферного углерода в почвы. Поэтому не выработан консенсус о совместном балансе основных экологических функций почв [41], характеризующих круговорот углерода и азота в системе: почва–растения–атмосфера при разных системах обработки, включая нулевую обработку почв. В целом устойчивый баланс этих экологических функций почв характеризует высокое качество почв. Под качеством почв понимают [42]: способность почвы функционировать в пределах границ естественной и управляемой экосистемы; поддерживать устойчивую продуктивность растений и животных; поддерживать или улучшать качество воды и воздуха; обеспечивать здоровье людей. Эффективность применения нулевой обработки почв необходимо оценивать не только по объемам выбросов  $CO_2$ , но и на основе результатов исследований интенсивности и объемов выбросов других парниковых газов –  $N_2O$  и метана ( $CH_4$ ).

Результаты недавних исследований показали, что нулевая обработка почв способствовала достоверному повышению эмиссии  $N_2O$  из них вследствие усиления активности почвенных микроорганизмов, участвующих в микробиологическом процессе денитрификации [43, 44]. Нулевая обработка почвы, как правило, способствует накоплению большего содержания влаги, чем об-

щепринятая [45]. С одной стороны, содержание почвенной влаги и доступного органического вещества, плотность сложения почвы и температура при нулевой обработке являются факторами увеличения потенциала образования  $N_2O$  и  $CH_4$ . С другой стороны, нулевая обработка почвы способствует повышению объемов макропор, непрерывности порового пространства и уменьшению величины рН. Уменьшение рН приводит к снижению интенсивности образования  $CH_4$ , в то время как повышение рН вызывает ее увеличение. Повышенные эмиссии  $N_2O$  из почв могут быть обусловлены высокой чувствительностью редуктазы  $N_2O$  к уменьшению показателя рН [46]. Поэтому рациональное применение нулевой обработки почв с целью уменьшения выбросов  $N_2O$  и  $CH_4$  требует контроля не только физических и водно-физических, но и физико-химических свойств почв.

В целом анализ эффективности адаптации нулевой обработки должен включать результаты исследований изменений метеорологических параметров (количества и частоты осадков, температуры воздуха), физических, водно-физических, физико-химических свойств в конкретных условиях выращивания сельскохозяйственных культур.

Несмотря на перечисленные преимущества нулевой обработки почв в улучшении и сохранении их почвенного плодородия, ее адаптация и распространение в нашей стране происходят медленно. Тем не менее, по данным Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных наций (FAO), за последние 10 лет количество территорий с нулевой обработкой увеличилось с 1.7 млн га (2009 г.) до 200 млн га в (2019 г.), т.е. ~16% пахотных площадей в мире, которые составляют 1.3 млрд га. В 2020 г. в Китае была принята программа по сохранению почв. В Европе, которая лидирует в мировой климатической повестке, отмечен экспоненциальный рост сельскохозяйственных площадей, на которых применяют нулевую обработку почв. Для более быстрой и эффективной адаптации систем нулевой обработки почв важно объединение знаний и усилий как сельхозпроизводителей, так и научного сообщества, для построения национальной системы мониторинга и учета запасов углерода в почвах и выбросов парниковых газов в Российской Федерации [47]. В связи с этим особенно актуальны и значимы исследования, выполняемые в реальных агрохозяйствах, практикующих и совершенствующих данную ресурсосберегающую технологию. Цель работы — оценка влияния нулевой обработки почвы на динамику запасов  $C_{орг}$  и эмиссию парниковых газов ( $CO_2$ ,  $N_2O$ ,  $CH_4$ ) в условиях растениеводческого хозяйства (ООО “Орловка АИЦ”, Самарская обл.).

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнили на территории растениеводческого хозяйства ООО “Орловка АИЦ” Самарской обл. Основная территория хозяйства расположена на плоских и слабоволнистых плакорах с доминированием типичных и выщелоченных черноземов, сформированных на бурых глинах и глинистом мергеле. В хозяйстве реализуется 5-польный севооборот, включающий сою, пшеницу, подсолнечник, сорго и ячмень. В качестве контроля был выбран чернозем типичный тяжелосуглинистый широколиственного леса возрастом  $\leq 60$  лет.

Отбор образцов почвы для определения плотности сложения (слои 0–5, 5–10, 10–15 и 15–20 см) и содержания углерода (слои 0–10, 10–20, 20–30, 30–40, 40–50 и 100 см) провели в сентябре 2021 г. По 2 почвенных разреза заложили на участках с нулевой обработкой почвы (применение с 2014 и 2017 г.) и на участке с традиционной обработкой почвы, а также один разрез — в лесу. Характеристики объекта исследования представлены в табл. 1. Для каждого экспериментального участка выбрали 4 пространственно-удаленные местоположения, в которых проводили отбор образцов воздуха для определения эмиссии парниковых газов ( $CO_2$ ,  $N_2O$ ,  $CH_4$ ) из почвы. Эмиссию парниковых газов из почвы определяли методом закрытых камер [50] с использованием портативного газового хроматографа “ПИА” (Россия) для анализа концентрации  $CO_2$  и  $CH_4$ . Для анализа концентрации  $N_2O$  использовали хроматограф “Agilent 7890 A” с масс-селективным детектором 5975С (США). Скорость эмиссии парниковых газов рассчитывали по величине прироста их концентрации внутри камеры (объем 6.8 л) за фиксированный период времени: 3–5 мин для  $CO_2$  и 40 мин для  $N_2O$  и  $CH_4$ . Одновременно регистрировали температуру почвы на глубине 10 см и отбирали почвенные образцы из слоя 0–10 см для определения содержания влаги и минерального азота в аммонийной и нитратной форме. Важно отметить, что вегетационный период 2021 г. был очень засушливым: количество осадков составило всего 91 мм.

Для определения содержания общего и органического углерода ( $C_{общ}$  и  $C_{орг}$ ) в почве использовали методы “мокрого” ( $C_{орг}$ ) и “сухого” ( $C_{общ}$ ) сжигания, рекомендованные FAO [48, 49]. Анализ  $C_{общ}$  выполняли с использованием автоматического CHNS анализатора “Vario EL III” (Германия). Плотность сложения почвы, образцы которой отбирали с помощью метода “режущих” цилиндров объемом 88 см<sup>3</sup>, рассчитали как отношение массы сухой почвы (естественное сложение

Таблица 1. Общая характеристика объектов исследования

| Система обработки почвы                                | Почвенная разновидность                                                                        | Вид угодья /культура или доминантная растительность                 | Климатические характеристики                                                                                |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Традиционная с оборотом пласта                         | Чернозем выщелоченный среднегумусный мало-мощный легкоглинистый                                | Пашня/подсолнечник                                                  | Климат умеренно-континентальный.                                                                            |
| Нулевая с 2017 г. (4 года) (поле G-70)                 | Чернозем выщелоченный среднегумусный мало-мощный легкоглинистый                                | Пашня/подсолнечник                                                  | Средняя годовая температура воздуха 5.7°C. Годовое количество осадков 527 мм. Максимум осадков – июнь–июль. |
| Нулевая с 2014 г. (7 лет) (поле G-128b)                | Чернозем типичный карбонатный перерытый среднегумусный мало-мощный среднесмытый легкоглинистый | Пашня/пшеница                                                       | Характерны частые засухи. Вегетационный сезон 2021 г. засушливый, выпало всего 91 мм осадков:               |
| Без обработки (лес широколиственный возрастом ≥60 лет) | Чернозем оподзоленный среднегумусный средне-мощный среднеглинистый                             | Лес/липа ( <i>Tilia sp. L.</i> ), Лес/дуб ( <i>Quercus sp. L.</i> ) | апрель –21 мм,<br>май – 20 мм,<br>июнь – 38 мм,<br>июль – 12 мм,<br>август – 0 мм                           |

ние) к ее объему в цилиндре. Определение содержания в почве аммонийного ( $N-NH_4$ ) и нитратного ( $N-NO_3$ ) азота выполняли по ГОСТ 26488-85 с использованием спектрофотометра “UNICO” (США). В образцах растений содержание углерода и азота определяли методом сухого сжигания (CHNS-анализатор “Vario EL III”, Германия), фосфора – фотометрическим методом (спектрофотометр ПЭ-3000УФ, Китай) и калия – пламенно-фотометрическим методом (пламенный фотометр ПАЖ-2, Украина).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Содержание почвенного углерода.** Анализ данных содержания  $C_{орг}$  в почве показал, что длительное сельскохозяйственное использование агрочернозема приводило к значительным потерям этого элемента в основном из верхнего слоя 0–10 см (рис. 1). Установлено 2-кратное различие в содержании  $C_{орг}$  в этом слое почвы между агрочерноземами в агроценозах (традиционная и нулевая обработки) и в лесу (4.4 против 9.0%). Применение технологии нулевой обработки почвы в течение 4-х лет (с 2017 г.) способствовало незначительному повышению содержания  $C_{орг}$  в пахотном горизонте по сравнению с традиционной отвальной вспашкой от 4.1 до 5.1%. Для варианта более длительного использования данной ресурсосберегающей технологии (с 2014 г.) подобной тенденции не обнаружено, вероятно, из-за его расположе-

ния в транзитной зоне склона с характерным смывом верхнего слоя почвы в результате эрозии. Поэтому эффективность применения нулевой обработки почвы на склоновых участках следует оценивать на основе результатов анализа образцов, отобранных в аналогичных условиях рельефа, что будет одной из задач дальнейших исследований.

Закономерности изменений содержания  $C_{общ}$  и  $C_{орг}$  в почве как вниз по профилю, так и между почвами с 2-мя изученными технологиями обработки были аналогичными. Однако на глубине почвенного профиля (40–50 и 100 см) содержание  $C_{общ}$  было больше, чем содержание  $C_{орг}$ . Это объясняется присутствием в почвообразующих породах (глинистые мергели, бурые глины) исследованных агрочерноземов минеральных форм углерода в виде примесей карбонатов. Исходя из данных о содержании  $C_{орг}$  в почве, а также плотности ее сложения, были рассчитаны его запасы в слоях агрочернозема: 0–10, 0–30 и 0–100 см (рис. 2). При переходе от традиционной к нулевой обработке почвы произошло увеличение запасов  $C_{орг}$  в верхнем слое 0–10 см агрочернозема. Эти данные совпадали с результатами исследований других ученых [26]. Более высокие запасы  $C_{орг}$  в верхнем слое почвы при ее нулевой обработке, возможно, обусловлены более слабыми взаимодействиями между растительными остатками и минеральной фазой почвы, которые вызывают меньшую интенсивность минерализации  $C_{орг}$ . Однако для бо-

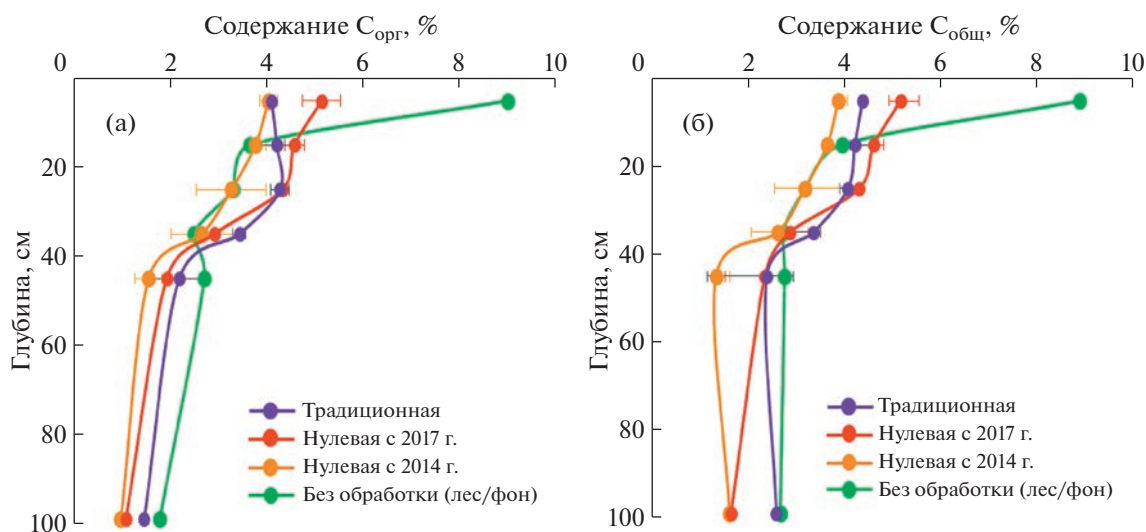


Рис. 1. Распределение содержания органического  $C_{org}$  (а) и общего углерода  $C_{общ}$  (б) в профиле почвы при разных технологиях обработки.

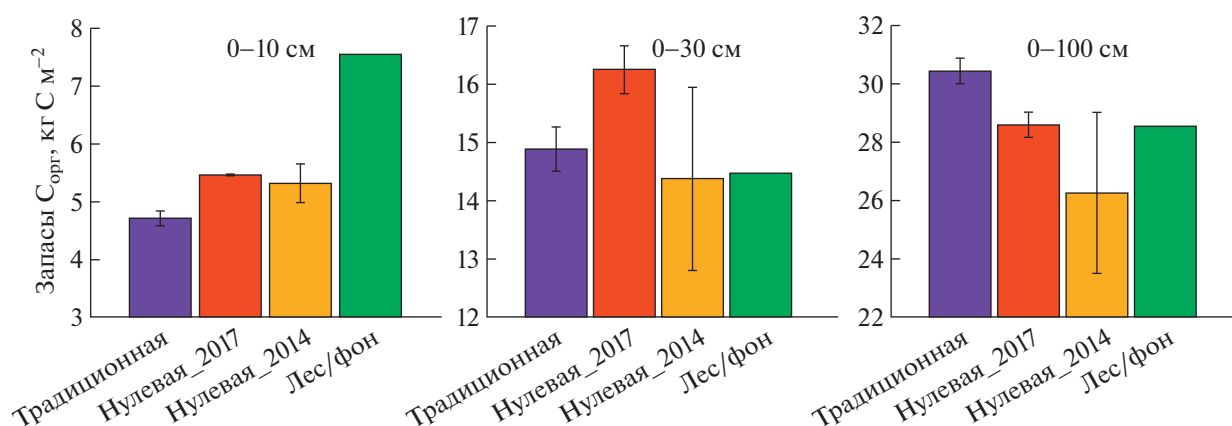
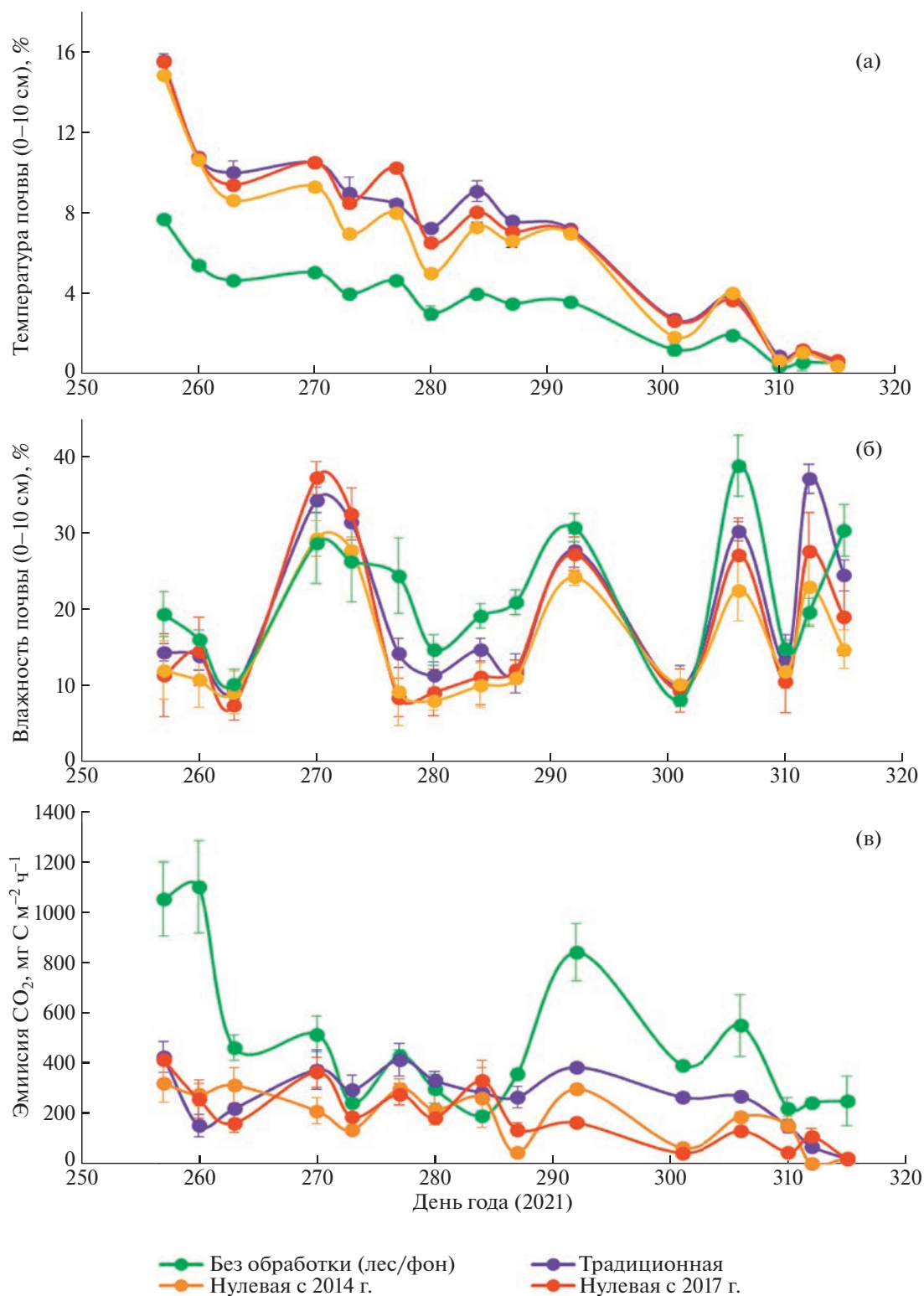


Рис. 2. Запасы органического углерода ( $C_{org}$ ,  $kg\ C/m^2$ ) в агрочерноземе с разной технологией обработки почвы.

лее мощного слоя 0–30 см почвы такая тенденция сохранялась только в одном из 2-х изученных вариантов – нулевая обработка с 2017 г. Кроме того, общие профильные запасы  $C_{org}$  (слой 0–100 см) оказались больше при традиционной обработке агрочернозема даже по сравнению с его ненарушенным фоновым аналогом (лесом). Таким образом, применение технологии нулевой обработки агрочернозема в первые 4–7 лет способствовало увеличению запасов  $C_{org}$  только в верхнем слое 0–10 см. В то время как профильные запасы этого элемента не зависели от использованной агротехнологии и характеризовались индивидуальными особенностями в каждом из изученных вариантов.

*Эмиссия парниковых газов с поверхности почвы.* За наблюдаемый осенний период (сентябрь–ноябрь) эмиссия  $CO_2$  из агрочернозема в изучен-

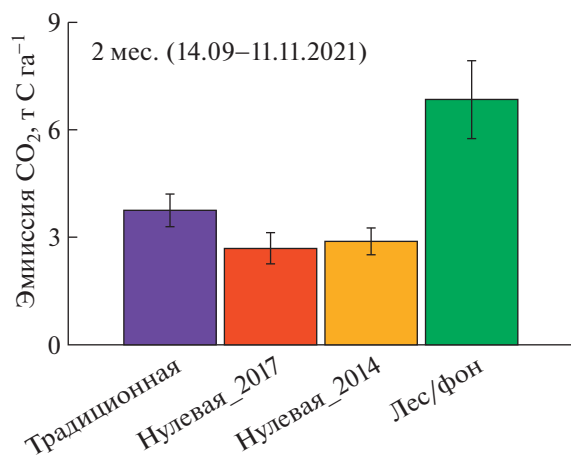
ных агроэкосистемах варьировала в широком диапазоне: от 19 до 1100  $mg\ C/m^2/ч$  (рис. 3). Причем временное варьирование этого процесса обуславливалось главным образом динамикой температуры почвы (коэффициент корреляции Пирсона  $r = 0.66–0.89$ ,  $p < 0.01$ ), в то время как изменение влажности почвы не оказывало значимого влияния на эмиссию  $CO_2$  ( $p > 0.05$ ). Кумулятивная эмиссия  $CO_2$  из почвы за наблюдаемый период (2 мес.) составила в среднем 2.8, 3.8 и 6.8 т С/га для нулевой обработки, традиционной отвальной вспашки и леса соответственно (рис. 4). Таким образом, измерения прямой эмиссии  $CO_2$  показали, что переход от традиционной к нулевой обработке агрочернозема способствовал уменьшению выбросов  $CO_2$  из почвы в атмосферу, что коррелировало с ранее выявленными зависимостями [17, 18, 20, 34].



**Рис. 3.** Динамика температуры (а), влажности (б) чернозема (слой 0–10 см) и эмиссии CO<sub>2</sub> из почвы (в) при разных технологиях обработки почвы.

За время наблюдений (сентябрь–ноябрь) почвенные концентрации CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>O в отобранных образцах воздуха достоверно не отличались от фоновых концентраций этих газов в атмосфере-

ном воздухе во всех вариантах исследования. Эти результаты в целом совпадают с данными других исследователей [3, 43], которые сообщили, что количество осадков является главным фактором

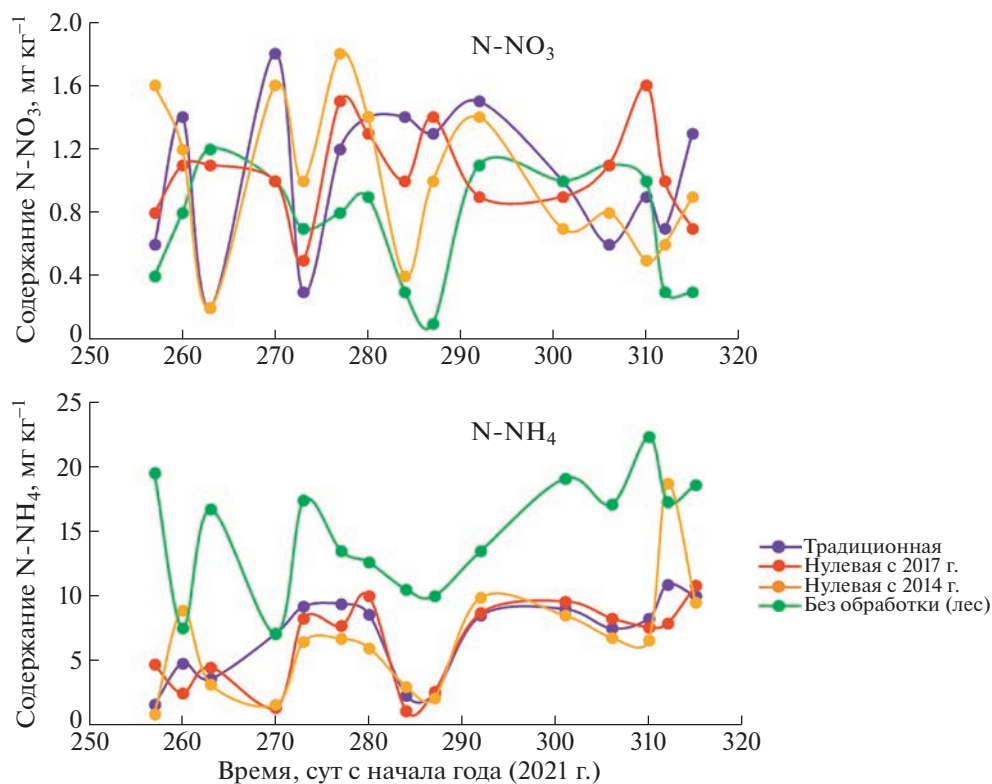


**Рис. 4.** Кумулятивная эмиссия  $\text{CO}_2$  из чернозема за 2 мес. (14.09–11.11.2021 г.) при разных технологиях обработки почвы.

влияния на эмиссию  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{CH}_4$  из почв. Эмиссия этих парниковых газов может быть существенной в годы с высоким количеством осадков и незначительной — в засушливые годы. Регион исследования в 2021 г. характеризовался малым количеством осадков и поэтому различия в эмиссии  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{CH}_4$  из почв с низким содержанием влаги были

незначительными, что не позволило выявить достоверных различий в эмиссиях этих парниковых газов из почв с нулевой и общепринятой обработкой. Предположительно, в периоды переувлажнения, исследованные почвы могут быть источником высоких выбросов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{CH}_4$ .

**Динамика содержания нитратного азота.** Динамика содержания  $\text{N-NO}_3^-$  в верхнем слое 0–10 см почвы в изученных экосистемах (лес, агроценозы с традиционной и нулевой обработкой) не имела какого-либо выраженного тренда за наблюдаемый осенний период (рис. 5). Содержание нитратного азота варьировало от 0.1 до 1.8 мг/кг почвы и в среднем было на 40% больше в почвах с нулевой и традиционной обработкой, чем в почве под лесом. Динамика содержания аммонийного азота ( $\text{N-NH}_4$ ) в черноземе показала тренд постепенного увеличения к концу периода исследования. Динамика содержания  $\text{N-NH}_4$  отрицательно коррелировала с изменениями температуры почвы: коэффициент корреляции Пирсона был равен  $-0.69$  (традиционная обработка),  $-0.58$  (нулевая обработка с 2017 г.),  $-0.60$  (нулевая обработка с 2014 г.) и  $-0.45$  (лес). В среднем за наблюдаемый период содержание  $\text{N-NH}_4$  в агрочерноземе изученных агроценозов было в 2.2 раза меньше, чем



**Рис. 5.** Динамика нитратного и аммонийного азота ( $\text{N-NO}_3$  и  $\text{N-NH}_4$ ) в верхнем слое 0–10 см чернозема при разных технологиях обработки.

**Таблица 2.** Плотность сложения чернозема при разных технологиях обработки почвы

| Тип обработки почвы              | Средняя плотность сложения чернозема $P \pm \Delta_p$ , ( $n = 2$ ), г/см <sup>3</sup> |           |           |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|
|                                  | Слой, см                                                                               |           |           |
|                                  | 0–10                                                                                   | 10–20     | 0–20      |
| Традиционная                     | 1.1 ± 0.1                                                                              | 1.2 ± 0.1 | 1.2 ± 0.1 |
| Нулевая с 2017 г. (поле G-70)    | 1.1 ± 0.1                                                                              | 1.2 ± 0.1 | 1.2 ± 0.1 |
| Нулевая с 2014 г. (поле G-128 b) | 1.2 ± 0.1                                                                              | 1.3 ± 0.1 | 1.3 ± 0.1 |
| Без обработки (лес/фон)          | 0.8 ± 0.1                                                                              | 1.0 ± 0.1 | 0.9 ± 0.1 |

в черноземе в лесу. Однако при сравнении традиционной и нулевой обработок агрочернозема не обнаружено достоверных различий в содержании  $N-NH_4$  и  $N-NO_3$  (ANOVA,  $p > 0.05$ ) в связи с отсутствием достоверных различий в содержании влаги — одного из основных факторов влияния на микробиологические процессы нитрификации и денитрификации [40, 51].

*Изменения плотности сложения почвы.* Механическая обработка почвы влечет за собой ее уплотнение в результате прямого воздействия на нее тяжелых транспортных средств. Для исследованного региона длительное сельскохозяйственное использование агрочернозема привело к увеличению его плотности сложения в верхнем пахотном слое (0–20 см) до 1.2–1.3 г/см<sup>3</sup>, что на 1/3 больше, чем для чернозема ненарушенной экосистемы — леса (табл. 2). Причем более длительное применение технологии нулевой обработки почвы (с 2014 г.) способствовало незначительно большему уплотнению почвы по сравнению с традиционной отвальной вспашкой. На исследо-

ванных участках не применяли биологические методы, которые могли бы способствовать разуплотнению почвы и восстановлению ее структуры. К таким методам можно отнести, в частности, выращивание промежуточных культур или культур с мощной и глубокой корневой системой. Однако внедрение этих методов осуществляется медленно из-за отсутствия унифицированных рекомендаций по их применению в практике ПРЗ.

*Поступление биогенных элементов (С, N, Р, К) в почву в составе растительных остатков при использовании технологии нулевой обработки почвы.* Характерной особенностью нулевой обработки почвы является максимальное сохранение пожнивных остатков на поверхности почвы, что способствует лучшему сохранению влаги в почве и дополнительному поступлению в нее различных элементов питания. Содержание С, N, Р и К определили в составе надземной и корневой биомассы различных культур в реализуемом севообороте: сорго, ячмень, пшеница, соя, подсолнечник (табл. 3). В среднем содержание С, N, Р и К в растительных остатках составило 43, 0.8, 0.1 и 1.0% соответственно. Причем в надземной биомассе по сравнению с корнями произошло большее накопление N, Р и К в среднем в 1.9, 1.6 и 3.6 раза соответственно. Среди возделываемых культур большей биогенной аккумуляцией N отличались ячмень и соя (в среднем 1.4 и 1.1%), меньшей — сорго и подсолнечник (0.4 и 0.3%). Наибольшее содержание фосфора обнаружено в растительных остатках ячменя (в среднем 0.14%), наименьшее — сорго и подсолнечника (0.04 и 0.05%). Большей биогенной аккумуляцией калия отличалось сорго (в среднем 1.8%), меньшей — пшеница (0.4%). Таким образом, анализ содержания основных биогенных элементов в надземной и корневой биомассах различных сельскохозяйственных культур показал, что ячмень и соя обладали наибольшей

**Таблица 3.** Содержание биогенных элементов (углерода, азота, фосфора и калия) в биомассе сельскохозяйственных культур и поступления их в почву из растительных остатков при использовании технологии нулевой обработки почвы (вегетационный период 2021 г.)

| Культура     | Содержание в биомассе, наземная часть/корни, % |           |             |           | Поступление в почву с растительными остатками (PO), кг/га |      |    |     |    |
|--------------|------------------------------------------------|-----------|-------------|-----------|-----------------------------------------------------------|------|----|-----|----|
|              | С                                              | N         | Р           | К         | PO                                                        | С    | N  | Р   | К  |
| Сорго        | 41.6/40.9                                      | 0.39/0.39 | 0.027/0.043 | 2.54/0.96 | 645                                                       | 268  | 3  | 0.2 | 16 |
| Ячмень       | 42.7/40.8                                      | 1.64/1.12 | 0.190/0.094 | 1.08/0.46 | 4030                                                      | 1720 | 66 | 7.7 | 44 |
| Пшеница      | 42.9/45.5                                      | 0.94/0.62 | 0.110/0.098 | 0.56/0.24 | 2160                                                      | 928  | 20 | 2.4 | 12 |
| Соя          | 42.6/45.6                                      | 1.61/0.50 | 0.130/0.054 | 1.59/0.24 | 1860                                                      | 792  | 30 | 2.4 | 30 |
| Подсолнечник | 40.7/45.0                                      | 0.48/0.20 | 0.058/0.034 | 1.52/0.38 | 2480                                                      | 1010 | 12 | 1.4 | 38 |

аккумулирующей способностью в отношении азота и фосфора, а сорго — в отношении калия. На основе данных о среднем количестве оставшихся на поверхности почвы растительных остатков после уборки урожая, в табл. 3 приведено общее поступление С, К, N и Р в почву на единицу площади. Оказалось, что наибольшее количество С, К, N и Р поступало в почву с растительными остатками ячменя.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, эффективность ресурсосберегающих технологий в увеличении секвестрации  $C_{орг}$  в почве и в снижении выбросов парниковых газов из почвы во многом остается дискуссионной. Результаты предварительного исследования агрочерноземов с нулевой и традиционной обработкой в условиях Среднего Поволжья (сентябрь–ноябрь 2021 г.) подтвердили, что при переходе от общепринятой к нулевой обработке агрочернозема тяжелосуглинистого за первые 4 года произошло увеличение запасов  $C_{орг}$  в верхнем слое 0–10 см почвы на 13–17% и снижение выбросов  $CO_2$  из почвы на 26%. Кроме того, нулевая обработка почвы способствовала наиболее “экологичному” восполнению в ней запасов питательных элементов за счет минерализации пожнивных растительных остатков после уборки урожая. Установлено, что на участках с нулевой обработкой с остатками культур (ячмень, пшеница, подсолнечник, соя, сорго) в почву поступило 268–1720 кг С, 3–66 кг N, 0.2–7.7 кг Р и 12–44 кг К/га. Это количество поступивших в почву питательных элементов соизмеримо с дозами минеральных удобрений, применяемых в других хозяйствах при выращивании сельскохозяйственной продукции, что позволяет сократить их дозы. Совершенствование и адаптация данной ресурсосберегающей технологии в исследованных почвенно-климатических условиях в будущем должны быть сфокусированы на поиске и разработке оптимальных методов борьбы с переуплотнением почвы, например, путем введения в севообороты культур с мощной и глубоко проникающей корневой системой. Кроме того, дальнейший анализ и мониторинг влияния нулевой обработки почв на их свойства требуют пространственного увеличения количества точек исследования, чтобы достоверно учесть пестроту почвенного покрова, обусловленную разнообразием подстилающих материнских пород и рельефом. Это также позволит в дальнейшем совершенствовать данную ресурсосберегающую технологию согласно принципам адаптивно-ландшафтного земледелия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)” / Под ред. Р.С.-Х. Эдельгериева. Т. 2. М.: Изд-во МБА, 2019. 476 с.
2. Haque M.M., Biswas J.C., Salahin N., Alam M.K., Akhter S., Akhtar S., Maniruzzaman M., Hossain M.S. Tillage systems influence on greenhouse gas emission factor and global warming potential under rice-mustard-rice cropping system // Arch. Agron. Soil Sci. 2022. P. 1–16.
3. Huang Y., Ren W., Wang L., Hui D., Grove J.H., Yang X., Tao B., Goff B. Greenhouse gas emissions and crop yield in no-tillage systems: A meta-analysis // Agricult. Ecosyst. Environ. 2018. V. 268. P. 144–153.
4. Virk A.L., Liu W.S., Chen Z., Yves N., Bohoussou D., Cheema M.A., Khan T.S., Zhao X., Zhang H.L. Effects of different tillage systems and cropping sequences on soil physicochemical properties and greenhouse gas emissions // Agricult. Ecosyst. Environ. 2022. V. 335. N. 108010.
5. Jarecki M.K., Lal R. Crop management for soil carbon sequestration // Critic. Rev. Plant Sci. 2003. V. 22(6). P. 471–502.
6. Lal R., Follett R.F., Stewart B.A., Kimble J.M. Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security // Soil Sci. 2007. V. 172(12). P. 943–956.
7. Lessmann M., Ros G.H., Young M.D., de Vries W. Global variation in soil carbon sequestration potential through improved cropland management // Global Change Biol. 2022. V. 28(3). P. 1162–1177.
8. Padarian J., Minasny B., McBratney A., Smith P. Soil carbon sequestration potential in global croplands // Peer. J. 2022. V.10. e13740.
9. Paustian K., Six J., Elliott E.T., Hunt H.W. Management options for reducing  $CO_2$  emissions from agricultural soils // Biogeochemistry. 2000. V. 48(1). P. 147–163.
10. Zhao J., Liu Z., Lai H., Yang D., Li X. Optimizing residue and tillage management practices to improve soil carbon sequestration in a wheat-peanut rotation system // J. Environ. Manag. 2022. V. 306. N. 114468.
11. Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security // Science. 2004. V. 304(5677). P. 1623–1627.
12. Balashov E., Buchkina N. Impact of short-and long-term agricultural use of chernozem on its quality indicators // Inter. Agrophys. 2011. V. 25(1). P. 1–5.
13. López-Garrido R., Madejón E., Murillo J.M., Moreno F. Soil quality alteration by mouldboard ploughing in a commercial farm devoted to no-tillage under Mediterranean conditions // Agricult. Ecosyst. Environ. 2011. V. 140(1–2), P. 182–190.
14. de Oliveira L.E.Z., de Souza Nunes R., de Sousa D.M.G., de Figueiredo C.C. Dynamics of residual phosphorus forms under different tillage systems in a Brazilian Oxisol // Geoderma. 2020. V. 367. 114254.
15. Xu J., Han H., Ning T., Li Z., Lal R. Long-term effects of tillage and straw management on soil organic carbon,

- crop yield, and yield stability in a wheat-maize system // *Field Crop. Res.* 2019. V. 233. P. 33–40.
16. *Castellini M., Fornaro F., Garofalo P., Giglio L., Rinaldi M., Ventrella D., Vitti C., Vonella A.V.* Effects of no-tillage and conventional tillage on physical and hydraulic properties of fine textured soils under winter wheat // *Water*. 2019. V. 11(3). P. 484.
  17. *Ogle S.M., Alsaker C., Baldock J., Bernoux M., Breidt F.J., McConkey B., Regina K., Vazquez-Amabile G.G.* Climate and soil characteristics determine where no-till management can store carbon in soils and mitigate greenhouse gas emissions // *Sci. Rep.* 2019. V. 9(1). P. 1–8.
  18. *Paustian K., Six J., Elliott E.T., Hunt H.W.* Management options for reducing CO<sub>2</sub> emissions from agricultural soils // *Biogeochemistry*. 2000. V. 48(1). P. 147–163.
  19. *Phogat M., Dahiya R., Goyal V., Kumar V.* Impact of long term zero tillage on soil physical properties: A review // *J. Pharmacogn. Phytochem.* 2020. V. 9(5). P. 2959–2967.
  20. *Six J., Bossuyt H., Degryze S., Denef K.* A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics // *Soil Till. Res.* 2004. V. 79(1). P. –31.
  21. *Vizioli B., Cavalieri-Polizeli K.M.V., Tormena C.A., Barth G.* Effects of long-term tillage systems on soil physical quality and crop yield in a Brazilian Ferralsol // *Soil Till. Res.* 2021. V. 209. 104935.
  22. *Zhang Y., Xie D., Ni J., Zeng X.* Conservation tillage practices reduce nitrogen losses in the sloping upland of the Three Gorges Reservoir area: No-till is better than mulch-till // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2020. V. 300. 107003.
  23. *Bhattacharyya S.S., Ros G.H., Furtak K., Iqbal H.M., Parra-Saldívar R.* Soil carbon sequestration – An interplay between soil microbial community and soil organic matter dynamics // *Sci. Total Environ.* 2022. N. 152928.
  24. *Dewi R.K., Fukuda M., Takashima N., Yagioka A., Komatsuzaki M.* Soil carbon sequestration and soil quality change between no-tillage and conventional tillage soil management after 3 and 11 years of organic farming // *Soil Sci. Plant Nutr.* 2022. V. 68(1). P. 133–148.
  25. *Kan Z.R., Liu W.X., Liu W.S., Lal R., Dang Y.P., Zhao X., Zhang H.L.* Mechanisms of soil organic carbon stability and its response to no-till: A global synthesis and perspective // *Global Change Biol.* 2022. V. 28(3). P. 693–710.
  26. *Ussiri D.A., Lal R.* Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio // *Soil Till. Res.* 2009. V. 104(1). P. 39–47.
  27. *Christopher S.F., Lal R., Mishra U.* Regional study of no-till effects on carbon sequestration in the Midwestern United States // *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 2009. V. 73 (1). P. 207–216.
  28. *Гилев С.Д., Цымбаленко И.Н., Курлов А.П., Русакова И.В.* Микробоценоз чернозема выщелоченного и динамика органического вещества при минимизации обработки почвы в условиях Зауралья // *АПК России*. 2015. Т. 73. С. 104–110.
  29. *Кураченко Н.Л., Колесник А.А.* Структура и запасы гумусовых веществ чернозема в условиях основной обработки почвы // *Вестн. КрасГАУ*. 2017. № 9. С. 149–157.
  30. *Холодов В.А., Ярославцева Н.В., Яшин М.А., Фархадов Ю.Р., Ильин Б.С., Лазарев В.И.* Содержание органического углерода и азота в размерных фракциях агрегатов типичных черноземов // *Почвоведение*. 2021. № 3. С. 320–326.
  31. *Завалин А.А., Дриггер В.К., Белобров В.П., Юдин С.А.* Азот в черноземах при традиционной технологии обработки и прямом посеве // *Почвоведение*. 2018. № 12. С. 1506–1516.
  32. *Мокриков Г.В., Казеев К.Ш., Мясникова М.А., Акименко Ю.В., Колесников С.И.* Влияние технологии прямого посева на почвенную мезофауну, дыхание и ферментативную активность черноземов южных // *Агрохим. вестн.* 2019. № 5. С. 31–36.
  33. *Холодов В.А., Белобров В.П., Ярославцева Н.В., Яшин М.А.* Влияние технологии прямого посева на распределение органического углерода и азота во фракциях агрегатов черноземов типичных, обыкновенных и южных // *Почвоведение*. 2021. № 2. С. 240–246.
  34. *Horák J., Balashov E., Šimanský V., Igaz D., Buchkina N., Aydın E., Bárek V., Drgoňová K.* Effects of conventional moldboard and reduced tillage on seasonal variations of direct CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from a loam Haplic Luvisol // *Biologia*. 2019. V. 74. P. 767–782.
  35. *Liu X.J., Mosier A.R., Halvorson A.D., Reule C.A., Zhang F.S.* Dinitrogen and N<sub>2</sub>O emissions in arable soils: Effect of tillage, N source and soil moisture // *Soil Biol. Biochem.* 2007. V. 39(9). P. 2362–2370.
  36. *Petersen S.O., Schjønning P., Thomsen I.K., Christensen B.T.* Nitrous oxide evolution from structurally intact soil as influenced by tillage and soil water content // *Soil Biol. Biochem.* 2008. V. 40(4). P. 967–977.
  37. *Smith W.N., Grant B.B., Desjardins R.L., Rochette P., Drury C.F., Li C.* Evaluation of two process-based models to estimate soil N<sub>2</sub>O emissions in Eastern Canada // *Canad. J. Soil Sci.* 2008. V. 88(2). P. 251–260.
  38. *Wang H., Wang S., Yu Q., Zhang Y., Wang R., Li J., Wang X.* No-tillage increases soil organic carbon storage and decreases carbon dioxide emission in the crop residue–returned farming system // *J. Environ. Manag.* 2020. V. 261. 110261.
  39. *Badagliacca G., Benítez E., Amato G., Badalucco L., Giambalvo D., Laudicina V.A., Ruisi P.* Long-term no-tillage application increases soil organic carbon, nitrous oxide emissions and faba bean (*Vicia faba* L.) yields under rain-fed Mediterranean conditions // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 639. P. 350–359.
  40. *Wrage N., Velthof G.L., van Beusichem M.L., Oenema O.* Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide // *Soil Biol. Biochem.* 2001. V. 33(12–13). P. 1723–1732.
  41. *De Kimpe C.D., Warkentin B.P.* Soil functions and the future of natural resources // *Adv. Geocol.* 31. Catena Verlag, Reiskirchen, Germany, 1998. V. 1. P. 3–10.
  42. *Karlen D.L., Ditzler C.A., Andrews S.S.* Soil quality: why and how? // *Geoderma*. 2003. V. 114(3–4). P. 145–156.

43. Almaraz J.J., Mabood F., Zhou X., Madramootoo C., Rochette P., Ma B. L., Smith D.L. Carbon dioxide and nitrous oxide fluxes in corn grown under two tillage systems in southwestern Quebec // *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 2009. V. 73(1), P. 113–119.
44. Ma Y., Sun L., Zhang X., Yang B., Wang J., Yin B., Yan X., Xiong Z. Mitigation of nitrous oxide emissions from paddy soil under conventional and no-till practices using nitrification inhibitors during the winter wheat-growing season // *Biol. Fertil. Soil.* 2013. V. 49(6). P. 627–635.
45. Abdalla M., Osborne B., Lanigan G., Forristal D., Williams M., Smith P., Jones M.B. Conservation tillage systems: a review of its consequences for greenhouse gas emissions // *Soil Use Manag.* 2013. V. 29(2). P. 199–209.
46. Zhang Y., Zhao J., Huang X., Cheng Y., Cai Z., Zhang J., Müller C. Microbial pathways account for the pH effect on soil N<sub>2</sub>O production // *Europ. J. Soil Biol.* 2021. V. 106. N. 103337.
47. Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Душанин Ю.А., Козлов Д.Н. Методологические подходы формирования единой Национальной системы мониторинга и учета баланса углерода и выбросов парниковых газов на землях сельскохозяйственного фонда Российской Федерации // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева.* 2021. Вып. 108. С. 175–218.
48. Стандартная рабочая методика. Органический углерод почвы Спектрофотометрический метод Тюрина. Рим: ФАО, 2021.  
<https://www.fao.org/3/cb4757ru/cb4757ru.pdf>
49. Руководство ФАО по оценке содержания органического углерода почвы. 2021 г., стандарт VCS сертификационного агентства Verra, 2022 г.
50. Buchkina N., Rizhiya E., Balashov E. N<sub>2</sub>O emission from a loamy sand Spodosol as related to soil fertility and N-fertilizer application for barley and cabbage // *Arch. Agron. Soil Sci.* 2012. V. 58. P. 141–146.
51. Dobbie K.E., Smith K.A. Nitrous oxide emission factors for agricultural soils in Great Britain: The impact of soil water-filled pore space and other controlling variables // *Global Change Biol.* 2003. V. 9(2). P. 204–218.

## Assessment of Greenhouse Gas Emissions and Carbon Reserves with Zero Processing of Chernozem in the Conditions of the Forest-Steppe Zone of the Middle Volga Region

L. V. Orlova<sup>a, #</sup>, N. M. Trots<sup>b</sup>, V. I. Platonov<sup>c</sup>, E. V. Balashov<sup>d</sup>, S. V. Sushko<sup>d</sup>,  
I. N. Kolesnichenko<sup>c</sup>, S. V. Orlov<sup>e</sup>, and E. V. Kruglov<sup>f</sup>

<sup>a</sup> National Movement of Saving Agriculture  
Kuibyshev ul. 88, Samara 443099, Russia

<sup>b</sup> Samara State Agrarian University  
Uchebnaya ul. 2, Ust-Kinelsky settlement, Kinel 446442, Russia

<sup>c</sup> Samara National Research University named after akad. S.P. Korolev  
Moskovskoe shosse 34, Samara 443086, Russia

<sup>d</sup> Agrophysical Institute  
Grazhdansky prosp. 14, St. Petersburg 195220, Russia

<sup>e</sup> LLC "Orlovka-Agro-Innovation Center"  
ul. Tsentralnaya 42E, Samara region, Pokhvistnevsky district, d. Stary Amanak village 446472, Russia

<sup>f</sup> Samara State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation  
ul. Gagarina 20, Samara 443079, Russia

<sup>#</sup> E-mail: orlova.rmrl@gmail.com

The transition from conventional soil treatment technology to zero treatment technology contributes to an increase in carbon sequestration (Sorg) in the form of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) from the atmosphere into the soil and, as a result, a reduction in the adverse effects of the greenhouse effect on the ecological state of the environment. The effectiveness of the application of zero tillage is to a greater or lesser extent due to specific agro-climatic conditions, crop rotation systems, fertilizers and plant protection, soil quality and stability. The influence of zero tillage on the dynamics of sorghum reserves and greenhouse gas emissions (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>) in the agro-climatic conditions of crop production (LLC "Orlovka AIC", Samara region) was investigated. The study was conducted on agrochernozem heavy loam in September–November 2021 in conditions of an abnormally arid growing season and high summer temperatures. On plots with zero tillage, plant residues were received: 268–1720 kg C/ha, 3–66 kg N, 0.2–7.7 kg P and 12–44 kg K/ha. Based on the results obtained, recommendations are proposed for further improving the efficiency of zero tillage technology due, firstly, to reducing its adverse effect on the density of soil composition, and, secondly, taking into account the influence of underlying parent rocks and relief on water erosion of soil and redistribution of granulometric fractions of soil in the agricultural landscape, which will allow using this technology according to principles of adaptive landscape farming.

**Keywords:** environmental resource-saving agriculture, zero and conventional tillage, soil properties, carbon sequestration, greenhouse gas emissions.

УДК 632.937:632.76:633.491

## ЭНДОФИТНЫЕ ШТАММЫ *BACILLUS THURINGIENSIS* ДЛЯ РАЗРАБОТКИ СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ЧИСЛЕННОСТИ КОЛОРАДСКОГО ЖУКА В ПОСАДКАХ КАРТОФЕЛЯ<sup>1</sup>

© 2023 г. А. В. Сорокань<sup>1,\*</sup>, Г. В. Беньковская<sup>1</sup>, И. С. Марданшин<sup>2</sup>,  
В. Ю. Алексеев<sup>1</sup>, С. Д. Румянцев<sup>1</sup>, И. В. Максимов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт биохимии и генетики — обособленное структурное подразделение  
Уфимского федерального исследовательского центра РАН  
450054 Уфа, просп. Октября 71, Россия

<sup>2</sup>Башкирский институт сельского хозяйства — обособленное структурное подразделение  
Уфимского федерального исследовательского центра РАН  
450059 Уфа, ул. Рихарда Зорге 19, Россия

\*E-mail: fourtyanns@googlegmail.com

Поступила в редакцию 25.11.2022 г.

После доработки 13.01.2023 г.

Принята к публикации 16.02.2023 г.

В настоящее время поиск штаммов *B. thuringiensis* для использования в качестве агентов биологического контроля основан на их токсичности для насекомых в лабораторных тестах. В то же время ряд штаммов этих бактерий способен существовать в симбиотических отношениях с растениями-хозяевами, в том числе являясь эндофитами. Способность штаммов *B. thuringiensis* проникать во внутренние ткани растений оценивали путем подсчета колониеобразующих единиц (КОЕ) микроорганизмов через 7 сут после инокуляции стерильных растений картофеля в пробирках; инсектицидную активность проверяли на личинках 3-го возраста, полученных от перезимовавших взрослых особей колорадского жука, собранных с полей в Чишминском и Иглинском р-нах Башкортостана. Показали, что штамм *B. thuringiensis* B-5351, который заселяет поверхность ( $50.0 \pm 8.1$  КОЕ  $\times 10^5$ /г) и внутренние ткани ( $38.9 \pm 9.6$  КОЕ  $\times 10^5$ /г) побегов растений, но обладает меньшей инсектицидной активностью, чем штамм *B. thuringiensis* B-5689, который проявляет высокую инсектицидную активность и колонизирует в основном корни растений ( $25.4 \pm 3.8$  КОЕ  $\times 10^5$ /г), уменьшил колонизацию посевов картофеля колорадским жуком, а также увеличил урожай клубней в 2-летнем эксперименте (2020–2021 гг.). Под влиянием *B. thuringiensis* B-5351 наблюдали уменьшение количества личинок раннего возраста в отличие от *B. thuringiensis* B-5689, который вызывал более длительные процессы метаморфоза. По-видимому, эффект *B. thuringiensis* B-5351 заключался в гибели насекомых. Важно, чтобы обработка *B. thuringiensis* B-5351 способствовала значительному снижению количества личинок последнего возраста на посевах, обработанных этим штаммом, а также степени дефолиации растений вредителем, чего не наблюдали при действии *B. thuringiensis* B-5689. На обработанных *B. thuringiensis* B-5351 делянках увеличивался выход товарных клубней и общей урожайности. Предложен метод изучения эндофитного потенциала штаммов по отношению к наземной части растений для поиска агентов биоконтроля в качестве основы для создания алгоритмов построения микробиомов в агроценозах.

**Ключевые слова:** *Leptinotarsa decemlineata*, *Solanum tuberosum*, *Bacillus thuringiensis*, биоконтроль, урожайность.

**DOI:** 10.31857/S0002188123050083, **EDN:** USIKJG

### ВВЕДЕНИЕ

Колорадский жук (КЖ) *Leptinotarsa decemlineata* Say — это важнейший вредитель картофеля, обладающий высоким адаптивным потенциалом [1]. На территорию Южного Урала и Поволжья вреди-

тель был завезен в 1975 г. и в дальнейшем распространился повсеместно [2]. До недавнего времени казалось, что для решения проблемы распространения КЖ достаточно рационального использования инсектицидов. Однако устойчивые к фосфорорганическим соединениям особи КЖ в ряде районов Республики Башкортостан были обнаружены уже в 1990-х гг. [2], к фипронилу — в 2006 г.

<sup>1</sup> Исследование выполнено в рамках проекта РНФ 20-76-00003.

[3]. К сожалению, на практике формирование резистентности вредителя к инсектицидам вынуждает сельхозпроизводителей увеличивать дозу применяемых веществ, способствуя формированию еще более устойчивых к ним популяций насекомых [4]. В этих условиях биологические пестициды привлекают к себе большое внимание, особенно благодаря выясненным недавно качествам бактерий рода *Bacillus*, способным не только обеспечить контроль численности целевых насекомых на обработанных растениях, но и существенно повысить иммунитет самих растений, а также регулировать их ростовые показатели, что несомненно впоследствии отражается на продуктивности [5].

В настоящее время в мире до 90% всех коммерческих биоинсектицидов производят на основе штаммов *Bacillus thuringiensis*. К данному моменту известно более 70 подвидов и 818 Cry-токсинов *B. thuringiensis*. По всему миру [6] интерес к поиску новых штаммов, их выделению из окружающей среды и селекции не ослабевает. Однако в популяциях насекомых, точно так же как и против химических инсектицидов, со временем развивается резистентность к Cry-токсинам, как и к другим классам инсектицидов [7]. Кроме того, главным недостатком препаратов на их основе является высокая чувствительность белковых токсинов к ультрафиолету [8]. Поэтому поиск штаммов, на основе которых будут разработаны биопрепараты, должен быть основан не только на данных о непосредственной инсектицидной активности вырабатываемых бактериями токсинов, но и на способности штаммов вступать в эндофитные отношения с растением-хозяином [9] на этапе лабораторных испытаний. Например, в последние годы сообщали о штаммах *B. thuringiensis*, которые могут существовать эндофитно, т.е. во внутренних тканях растений, где они защищены от внешних воздействий [10, 11] и способны индуцировать защитные реакции растений против фитофагов [11].

Цель работы — исследование инсектицидности и “эндофитности” бактерий как маркеров эффективности штаммов *B. thuringiensis* для разработки биопрепаратов, компоненты которых могли бы интегрироваться в состав агробиоценоза в качестве агентов биоконтроля.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения экспериментов использованы штаммы бактерий *B. thuringiensis* В-5689, *B. thuringiensis* В-5351 из коллекции лаборатории биохимии иммунитета растений Института биохимии и генетики Уфимского федерального иссле-

довательского центра РАН. Бактерии культивировали на среде *LB* (0.5 г NaCl /л) в камере “ТС 1/20” (СПУ, Россия) при температуре 28°C. Для оценки инсектицидной активности и влияния на урожайность картофеля использовали 16-часовые культуры. Титр клеток определяли при 600 нм на спектрофотометре “BioSpec-Mini” (Shimadzu, Япония).

Способность штаммов проникать во внутренние ткани растений оценивали путем подсчета колониеобразующих единиц (КОЕ) микроорганизмов через 7 сут после инокуляции стерильных пробирочных растений картофеля (сорт Ранняя Роза), культивируемых в течение 14 сут при 16-часовом освещении на агарозной среде Мурасиге—Скуга в климатостате “KBW E6” (Binder GmbH, Германия). Не менее 20 растений инокулировали 5  $\mu$ л суспензии каждого штамма ( $10^8$  клеток/мл) путем нанесения на поверхность нижней части стебля непосредственно в пробирочной культуре. Для оценки количества КОЕ на поверхности растений 100 мг образцов (надземная часть и корни) каждого отдельного экспериментального растения погружали в 30 мл стерильной дистиллированной воды на 30 мин при встряхивании (орбитальный шейкер “OS-20”, Biosan, Латвия). Затем извлеченные растения подвергали поверхностной стерилизации в следующем порядке: 70% этанол (1 мин)  $\rightarrow$  0.1% диацид-1 (3 мин)  $\rightarrow$  дистиллированная вода [11]. Образцы гомогенизировали в стерильных пакетах с помощью блендера “BagMixer 400 W” (Interscience, Франция) с добавлением 2 мл стерильной воды. Затем проводили 2 последовательных 10-кратных разведения полученного гомогената. Аликвоты (50 мкл) смывов с поверхности и гомогенатов при помощи шпателя Дригальского распределяли по поверхности картофельно-глюкозного агара до полного высыхания. Затем чашки Петри инкубировали при 28°C в термостате “ТС-1/20 СПУ” (ООО Смоленское СКТБ СПУ, Россия) в течение 24 ч. КОЕ подсчитывали во 2-м и 3-м разведении, количество пересчитывали на 1 г сырой массы растения.

**Инсектицидные свойства штаммов.** В экспериментах использовали личинки 3-го возраста, полученные от перезимовавших имаго КЖ, собранных в посадках картофеля в Чишминском (выборка 20.02) и Иглинском (выборка 20.03) р-нах Республики Башкортостан. Пробирочные стерильные растения (сорт Ранняя Роза) погружали в суспензию бактериальных культур ( $10^8$  клеток/мл) на 30 сек, затем просушивали на фильтровальной бумаге. Подсушенные растения помещали в чашки Петри с 20-ю личинками в 4-кратной повторности. В контроле корм обрабатывали стерильной

средой *LB*. До конца наблюдений личинкам давали свежий необработанный корм через каждые 24 ч. Фиксировали смертность личинок на 3-и, 5-е и 7-е сут после начала эксперимента.

**Полевые эксперименты.** Исследования проводили на полях Уфимского федерального научного центра РАН (опытная станция г. Бирск, 55°25'47.4"N 55°35'49.9" E) в посевных сезонах 2019 и 2020 гг. Поля располагались на дерново-подзолистых почвах. Почвы не заболочены, по текстуре супесчаные. Содержание гумуса — 3.2%, pH почвы 5.5–6.5 [12]. Фосфорные ( $P_{ст}$ ) и калийные ( $K_c$ ) удобрения вносили осенью под зяблевую обработку, азотные ( $N_{aa}$ ) — весной под перепашку в дозе N90P60K90.

Клубни картофеля сорта Удача высаживали в 3-х повторностях по 40 растений на делянку для каждого варианта 20 мая (2020 г.) и 26 мая (2021 г.) на глубину 8–10 см, по схеме посадки 75 × 30 см (ширина междурядий 75 см, расстояние в рядке 30 см). Планируемая густота стояния растений — 45000 шт./га. Использовали сажалку “Grimme GL 34T” (ГРИММЕ-Рус, Россия). Двухнедельные проростки опрыскивали суспензией экспериментальных штаммов *B. thuringiensis* ( $10^6$  клеток/растение). В контрольном варианте растения опрыскивали водой.

Плотность популяции КЖ наблюдали на 0-, 7-, 17- и 31-е сут после первой обработки в 2020 г. и на 0-, 8-, 17- и 29-е сут в 2021 г. Подсчитывали ( $\pm SE$ ) число кладок, количество яиц, личинок I–IV возрастов и имаго на одно растение в зависимости от обработок. Дефолиацию, вызванную КЖ, оценивали визуально на основе процентной системы ранжирования, в которой 100% соответствовало полной дефолиации растений, а 0 — отсутствию повреждений. Растения, прилегающие к свободным промежуткам между делянками, не обследовали во избежание краевого эффекта.

Клубни картофеля собирали на 65-е (2020 г.) и 60-е (2021 г.) сут после первой обработки со всех 40 растений на делянке. В день сбора урожая клубни разделяли на 3 фракции: мелкие (<50 г), семенные (от 50 до 80 г), крупные (>80 г) и взвешивали отдельно.

**Статистическая обработка.** Лабораторные опыты повторяли в трехкратной повторности. Средние величины со стандартными ошибками ( $\pm SE$ ) приведены на рисунках и в таблицах. Статистический анализ проводили с использованием Microsoft Excel 2013 для Windows (Microsoft Corporation, США) и IBM SPSS Statistics 12.0 (IBM Corporation, США). Различия исследованных параметров между отдельными обработками анали-

**Таблица 1.** Содержание клеток штаммов *B. thuringiensis* на поверхности и во внутренних тканях растений картофеля, КОЕ ×  $10^5$ /г

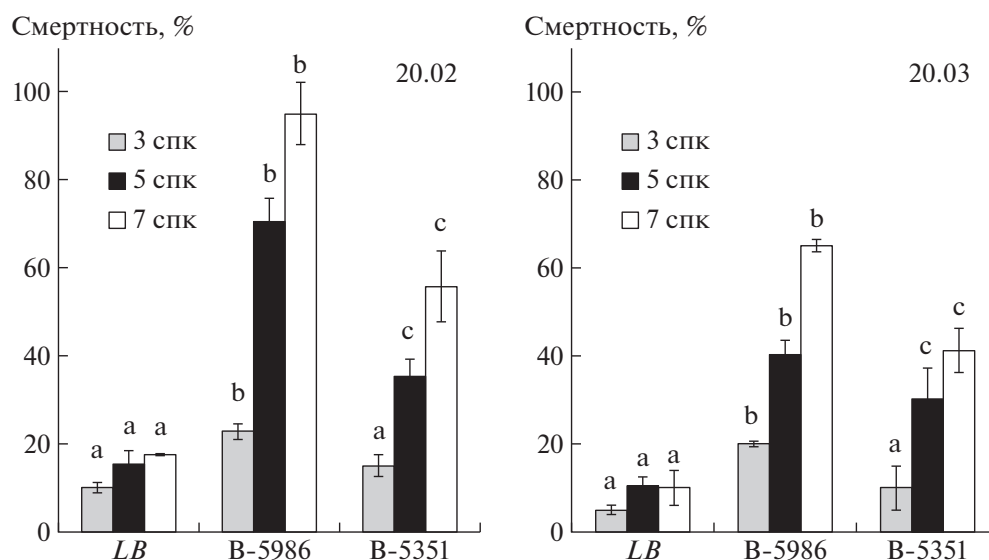
| Локализация        | Штаммы <i>B. thuringiensis</i> |              |
|--------------------|--------------------------------|--------------|
|                    | B-5689                         | B-5351       |
| Поверхность побега | 22.3 ± 6.6a                    | 50.0 ± 8.1b  |
| Ткани листа        | 7.75 ± 2.19a                   | 38.9 ± 9.6b  |
| Корень             | 25.4 ± 3.8a                    | 0.50 ± 0.13b |

зировали с использованием дисперсионного анализа. Данные в таблицах, помеченные одним и тем же символом, существенно не отличались друг от друга в соответствии с *HSD*-тестом Тьюки при  $p \leq 0.05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе проводили оценку способности штаммов заселять ткани стерильных растений картофеля. Выявлено, что к 7 сут после инокуляции *B. thuringiensis* B-5689 на поверхности побегов картофеля (надземная часть) находилось в 2 раза меньше жизнеспособных клеток, и более чем в 4 раза меньше — во внутренних тканях побега, чем в случае обработки растений штаммом *B. thuringiensis* B-5351 (табл. 1). При этом в корнях инокулированных клетками штамма *B. thuringiensis* B-5689, напротив, число КОЕ бактерий оказалось на 2 порядка больше, чем *B. thuringiensis* B-5351. То есть штамм B-5689 предпочитал заселять в большей степени корневую систему в сравнении со штаммом B-5351. Важно отметить, что инокуляцию производили в одной точке в нижней части поверхности стебля (без их механического повреждения), после чего бактериальные клетки системно распространились во все органы растений.

На следующем этапе была оценена инсектицидность экспериментальных штаммов. Оказалось, что штамм *B. thuringiensis* B-5689 вызывал смертность личинок КЖ уже через 3 сут после кормления суспензией клеток на более чем 20%, а к 7 сут — 95–100% (рис. 1). В то же время клетки штамма B-5351 характеризовались меньшей эффективностью и вызывали смертность только 60% личинок КЖ. Соответственно, бактерии *B. thuringiensis* B-5689 способствовали значительно большей гибели личинок КЖ, чем клетки штамма *B. thuringiensis* B-5351. Таким образом, хотя штамм *B. thuringiensis* B-5689 и обладал в лабораторных исследованиях большей инсектицидностью в сравнении со штаммом *B. thuringiensis* B-5351, он, в связи с невысокой способностью



**Рис. 1.** Влияние *B. thuringiensis* B-5986 и B-5351 на смертность личинок III возраста КЖ: спк — сутки после кормления; LB — листья, обработанные LB (контроль).

\*Буквами отмечены статистически значимые отличия показателей, наблюдаемых в соответствующей временной точке (при  $p \leq 0.05$ ).

существовать эндофитно в надземной части растений, в условиях вегетации проявил меньший защитный потенциал.

В течение 2-х сезонов (2020 и 2021 гг.) исследовали влияние бактериальных штаммов на заселенность посадок КЖ на всех стадиях жизненного цикла. Определили статистически значимые различия в среднем количестве отложенных КЖ яиц на одно растение между различными вариантами обработок (табл. 2). Влияние штаммов *B. thuringiensis* не наблюдали на начальном этапе после выхода имаго из почвы, но в период массовой откладки число яиц в расчете на 1 растение было значительно меньше на делянках, обработанных штаммом *B. thuringiensis* B-5351. Тогда как количество яиц, отложенных имаго, уменьшилось под влиянием *B. thuringiensis* B-5689 только на более поздних сроках. Стоит отметить, что на контрольных участках и обработанных *B. thuringiensis* B-5689 растениях среднее количество кладок яиц на одно растение увеличилось с 17 июня по 4 июля в 2 раза (2020 г.), но на участках, обработанных штаммом *B. thuringiensis* B-5351 этот показатель оставался низким. В 2021 г. все исследованные штаммы снижали максимальные показатели количества кладок за сезон.

Таким образом, штамм *B. thuringiensis* B-5351 более эффективно снижал количество кладок и количество яиц в кладках на одно растение, отражая их негативное влияние на привлекательность растений для откладывания яиц имаго. Это под-

тверждено 2-летними данными (2020 и 2021 гг.) о количестве особей имаго на растениях картофеля, обработанных исследованными штаммами, в период откладки яиц.

Количество личинок I и II возраста было стабильно на участках, обработанных *B. thuringiensis* B-5351 в 2021 г. На участках посадок картофеля, обработанных суспензией клеток штамма *B. thuringiensis* B-5689, количество личинок I возраста не отличалось от контрольного в течение сезона, а численность личинок II возраста увеличивалась медленнее, чем в контроле. Под воздействием штамма *B. thuringiensis* B-5689 число личинок I возраста снижалось в период массового отрождения, но эффект *B. thuringiensis* B-5351 был более длительным. Число личинок II возраста сокращалось при обработках и тем, и другим штаммом. Количество личинок III возраста на участках посадок картофеля под влиянием клеток штамма *B. thuringiensis* B-5689 в период их массового появления было в 2 раза меньше, чем в контроле, а под влиянием *B. thuringiensis* B-5351 — почти в 10 раз. При этом численность личинок IV возраста на участках посадок картофеля, обработанных штаммом B-5689, не снижалась, а на делянках, обработанных штаммом B-5351, личинки IV возраста обнаруживались позже и в меньшем количестве, чем в других вариантах. По-видимому, обработка растений *B. thuringiensis* B-5351 увеличивала срок, требуемый личинкам для перехода в следующую стадию развития (линьки).

Защитные мероприятия, как и ожидалось, с использованием штаммов бактерий способствовали сохранению урожая картофеля в сравнении. Например, обработка клетками бактерий *B. thuringiensis* В-5351 увеличивала общую урожайность посадок (табл. 3) на 30–35% относительно необработанных участков, что происходило за счет увеличения массы товарных клубней весом >80 г и семенных клубней массой 50–80 г. На участках, обработанных штаммом *B. thuringiensis* В-5689, увеличивалась только масса клубней во фракции 50–80 г. Обработка бактериальными штаммами способствовала снижению общей массы клубней весом <50 г относительно контроля, что свидетельствовало о положительном влиянии испытанных бактериальных штаммов на товарные качества выращенного картофеля.

В настоящее время исследования резистентности насекомых к бактериальным инсектотоксинам в какой-то мере сводят многообещающие возможности применения агентов биоконтроля к инсектицидному воздействию ограниченного класса молекул [13]. Существующий подход к разработке биологических препаратов также основывается на поиске (или получению путем генетической рекомбинации) штаммов, продуцирующих Cry-белки с наибольшей инсектицидной активностью, т.е. приравнивает биопрепараты на основе штаммов *B. thuringiensis* к химическим инсектицидам [14]. Вместе с тем, как показали наши исследования, и к показателю инсектицидности штаммов в полевых и лабораторных условиях необходимо подходить дифференцированно. Например, рис. 1 показал, что инсектицидный эффект штамма *B. thuringiensis* В-5689 против личинок КЖ значительно больше, чем *B. thuringiensis* В-5351, что делает его, как кажется, более перспективным кандидатом для применения в полевых условиях. Показана способность обоих изученных штаммов формировать с картофелем устойчивую ассоциативную систему хозяин–эндофит. Но, поскольку штамм *B. thuringiensis* В-5351 ассоциирован с надземными органами растений, в то время как *B. thuringiensis* В-5689 – с корневой системой растений, высокая инсектицидная активность суспензии клеток последнего штамма в полевых условиях сходит на нет из-за отсутствия непосредственного контакта с вредителем.

Известно, что 4 бразильских штамма *B. thuringiensis* в растениях капусты колонизировали ткани листа вблизи устьиц, через которые бактерии могут проникать в ткани, т.к. сосуды проводящей ткани продолжали образовывать вегетативные клетки, споры и кристаллы Cry-белков [10]. Кро-

ме того, показана способность ряда штаммов индуцировать защитные реакции растений против фитопатогенов и стимулировать рост растений [16], однако данных об их взаимодействии с растением-хозяином ничтожно мало. Можно полагать, что колонизация бактериями *B. thuringiensis* внутренних тканей растений позволяет им “уходить” от конкурентного давления со стороны других видов ризобактерий, чему в сильной степени подвергаются другие микроорганизмы, искусственно привнесенные в биоценозы [15].

После кратковременного снижения числа яиц КЖ на обработанных штаммом В-5689 растениях относительно контрольных показателей, откладка яиц самками продолжилась, а количество кладок и имаго не отличалось от наблюдаемых на контрольных участках. Под действием *B. thuringiensis* В-5689 либо снижалось (2020 г.) количество личинок I возраста, либо требовалось большее время для их отрождения и линьки (2021 г.). Эффекта на численность личинок старших возрастов данный штамм не оказывал, что в последующем приводило к значительному повреждению ботвы.

Под влиянием клеток штамма *B. thuringiensis* В-5351 кусты картофеля становились менее привлекательными для откладки яиц самками, на что указывало сокращение количества кладок и яиц в каждой. Наблюдалось снижение количества личинок I возраста на 17-е сут после обработки, при этом в отличие от штамма В-5689, вызывавшего более длительные процессы метаморфоза, по-видимому, эффект *B. thuringiensis* В-5351 заключался в гибели особей. Важно, что *B. thuringiensis* В-5351, присутствуя во внутренних тканях надземной части растений картофеля, способствовал долговременному значительному сокращению численности личинок III и IV возрастов в обработанных этим штаммом посадках. Так как наибольший урон картофелю наносят именно личинки КЖ, повреждение растений на делянках, обработанных *B. thuringiensis* В-5351, также было наименьшим в обоих сезонах.

Как и следовало ожидать, интенсивная дефолиация растений вследствие поедания их личинками и имаго колорадского жука приводила к формированию большого количества мелких клубней, как ранее наблюдали в случае использования химических инсектицидов против КЖ [17]. Обработка растений суспензией клеток бактерий обоих штаммов приводила к изменению структуры урожая картофеля, снижая массу мелких клубней как в 2020, так и 2021 вегетационном сезонах. Наиболее заметно это было на участках, обработанных суспензией клеток штамма *B. thuringiensis*

**Таблица 2.** Влияние обработки растений картофеля бактериями *B. thuringiensis* на плотность популяции колорадского жука (КЖ) в вегетационные сезоны 2020 и 2021 гг.

| Показатель,<br>шт./растение   | Дата отбора | H <sub>2</sub> O | <i>B. th.</i> В-5689 | <i>B. th.</i> В-5351 |
|-------------------------------|-------------|------------------|----------------------|----------------------|
| 2020 г.                       |             |                  |                      |                      |
| Яйца                          | 17.06       | 4.61 ± 1.34a     | 4.60 ± 1.98a         | 3.81 ± 2.11a         |
|                               | 24.06       | 17.4 ± 7.2a      | 10.32 ± 4.84a        | 5.02 ± 2.90b         |
|                               | 04.07       | 4.32 ± 0.98a     | 2.10 ± 0.54b         | 1.80 ± 0.34b         |
|                               | 18.07       | 0.28 ± 0.04a     | 0.35 ± 0.02a         | 0.11 ± 0.02b         |
| Кладки                        | 17.06       | 0.73 ± 0.21a     | 0.47 ± 0.06a         | 0.32 ± 0.07a         |
|                               | 24.06       | 1.35 ± 0.06a     | 0.82 ± 0.11b         | 0.40 ± 0.06c         |
|                               | 04.07       | 0.17 ± 0.01a     | 0.11 ± 0.02a         | 0.11 ± 0.03a         |
|                               | 18.07       | 0.53 ± 0.07a     | 0.45 ± 0.1a          | 0.72 ± 0.07a         |
| Имаго                         | 17.06       | 1.57 ± 0.34a     | 1.28 ± 0.01a         | 0.91 ± 0.01b         |
|                               | 24.06       | 2.62 ± 0.92a     | 2.72 ± 1.01a         | 0.73 ± 0.04b         |
|                               | 04.07       | 0.02 ± 0.01a     | 0.02 ± 0.003a        | 0.02 ± 0.01a         |
|                               | 18.07       | 0.72 ± 0.03a     | 0.21 ± 0.03b         | 0.20 ± 0.08b         |
| Личинки I возраста            | 17.06       | 0.01 ± 0.04a     | 0.03 ± 0.007a        | 0.01 ± 0.04a         |
|                               | 24.06       | 1.58 ± 0.75a     | 1.47 ± 0.14a         | 1.83 ± 0.50a         |
|                               | 04.07       | 8.59 ± 2.55a     | 7.34 ± 3.46a         | 4.65 ± 2.75b         |
|                               | 18.07       | 0.12 ± 0.03a     | 0.18 ± 0.03a         | 0.12 ± 0.04a         |
| Личинки II возраста           | 17.06       | 0a               | 0a                   | 0a                   |
|                               | 24.06       | 9.00 ± 2.63a     | 6.31 ± 1.14a         | 1.05 ± 0.07c         |
|                               | 04.07       | 2.63 ± 1.61a     | 5.40 ± 0.51b         | 1.33 ± 1.25c         |
|                               | 18.07       | 0.41 ± 0.04a     | 0.55 ± 0.03a         | 1.33 ± 0.74b         |
| Личинки III возраста          | 17.06       | 0a               | 0a                   | 0a                   |
|                               | 24.06       | 3.40 ± 1.03a     | 2.11 ± 0.92a         | 0.23 ± 0.52b         |
|                               | 04.07       | 12.75 ± 1.81a    | 5.2 ± 0.64b          | 0.91 ± 0.14c         |
|                               | 18.07       | 5.33 ± 3.63a     | 2.21 ± 1.8a          | 0.12 ± 0.04b         |
| Личинки IV возраста           | 17.06       | 0a               | 0a                   | 0a                   |
|                               | 24.06       | 0a               | 0a                   | 0a                   |
|                               | 04.07       | 3.21 ± 2.07a     | 2.13 ± 1.44a         | 0.11 ± 0.09b         |
|                               | 18.07       | 2.24 ± 1.07a     | 1.13 ± 1.04a         | 0.52 ± 0.08b         |
| Доля поврежденной<br>ботвы, % | 17.06       | 0a               | 0a                   | 0a                   |
|                               | 24.06       | 2.9 ± 1.85a      | 1.80 ± 0.34a         | 1.30 ± 0.85a         |
|                               | 04.07       | 16.74 ± 5.45a    | 8.82 ± 3.40a         | 4.83 ± 0.67b         |
|                               | 18.07       | 37.71 ± 6.88a    | 28.51 ± 6.28b        | 13.21 ± 3.26c        |
| 2021 г.                       |             |                  |                      |                      |
| Яйца                          | 26.06       | 5.61 ± 1.74a     | 4.82 ± 1.73a         | 4.80 ± 1.37a         |
|                               | 02.07       | 12.5 ± 3.4a      | 6.44 ± 3.62a         | 5.71 ± 2.21a         |
|                               | 24.07       | 3.35 ± 1.29a     | 6.10 ± 1.68a         | 1.16 ± 0.13b         |
|                               | 03.08       | 0.22 ± 0.17a     | 0.10 ± 0.02a         | 0.11 ± 0.03a         |
| Кладки                        | 26.06       | 1.66 ± 0.21a     | 0.72 ± 0.06b         | 0.34 ± 0.07c         |
|                               | 02.07       | 0.28 ± 0.06a     | 0.22 ± 0.11a         | 0.13 ± 0.06a         |
|                               | 24.07       | 0.12 ± 0.03a     | 0.12 ± 0.03a         | 0.12 ± 0.03a         |
|                               | 03.08       | 0.81 ± 0.07a     | 0.64 ± 0.1a          | 0.60 ± 0.8a          |

Таблица 2. Окончание

| Показатель,<br>шт./растение   | Дата отбора | H <sub>2</sub> O | <i>B. th.</i> B-5689 | <i>B. th.</i> B-5351 |
|-------------------------------|-------------|------------------|----------------------|----------------------|
| Имаго                         | 26.06       | 0.45 ± 0.02a     | 0.36 ± 0.01a         | 0.10 ± 0.01b         |
|                               | 02.07       | 0.36 ± 0.02a     | 0.37 ± 0.03a         | 0.10 ± 0.1b          |
|                               | 24.07       | 0.03 ± 0.007a    | 0.01 ± 0.003a        | 0.03 ± 0.005a        |
|                               | 03.08       | 0.23 ± 0.03a     | 0.16 ± 0.03a         | 0.17 ± 0.08a         |
| Личинки I возраста            | 26.06       | 0.12 ± 0.02a     | 0.03 ± 0.016b        | 0.07 ± 0.018a        |
|                               | 02.07       | 7.80 ± 2.01a     | 4.21 ± 1.06b         | 1.52 ± 0.59c         |
|                               | 24.07       | 7.60 ± 1.29a     | 5.53 ± 2.16a         | 2.51 ± 1.58b         |
|                               | 03.08       | 0.22 ± 0.05a     | 0.22 ± 0.05a         | 0.30 ± 0.08a         |
| Личинки II возраста           | 26.06       | 0a               | 0a                   | 0a                   |
|                               | 02.07       | 0.81 ± 0.3a      | 0.10 ± 0.01b         | 0.05 ± 0.05b         |
|                               | 24.07       | 4.12 ± 1.26a     | 2.00 ± 0.51b         | 2.10 ± 0.78b         |
|                               | 03.08       | 0.46 ± 0.02a     | 0.33 ± 0.04b         | 0.21 ± 0.04b         |
| Личинки III возраста          | 26.06       | 0a               | 0a                   | 0a                   |
|                               | 02.07       | 0a               | 0a                   | 0a                   |
|                               | 24.07       | 5.90 ± 1.80a     | 6.28 ± 0.64a         | 2.52 ± 1.25b         |
|                               | 03.08       | 0.51 ± 0.01a     | 0.27 ± 0.01b         | 0.11 ± 0.01b         |
| Личинки IV возраста           | 26.06       | 0a               | 0a                   | 0a                   |
|                               | 02.07       | 0a               | 0a                   | 0a                   |
|                               | 24.07       | 0.46 ± 0.11a     | 0.55 ± 0.21a         | 0b                   |
|                               | 03.08       | 0.85 ± 0.34a     | 0.7 ± 0.37a          | 0.50 ± 0.22b         |
| Доля поврежденной<br>ботвы, % | 26.06       | 0a               | 0a                   | 0a                   |
|                               | 02.07       | 1.00 ± 0.44a     | 1.53 ± 0.82a         | 1.33 ± 0.81a         |
|                               | 24.07       | 18.8 ± 3.8a      | 6.71 ± 2.25b         | 11.6 ± 2.71b         |
|                               | 03.08       | 36.6 ± 9.9a      | 18.6 ± 4.0b          | 12.0 ± 3.56c         |

B-5351. В этом случае увеличивалась общая урожайность и масса крупных клубней (≥80 г), собранных на участке в 2-х сезонах. Соответственно, можно полагать, что эндофитность штамма

*B. thuringiensis* B-5351 в надземных органах растений картофеля позволила реализовать его защитный инсектицидный потенциал в отношении КЖ, в отличие от *B. thuringiensis* B-5689.

Таблица 3. Влияние обработок бактериями *B. thuringiensis* на урожайность картофеля в вегетационные сезоны 2020 и 2021 гг.

| Масса клубней<br>с делянки, г | Фракции клубней | H <sub>2</sub> O | <i>B. th.</i> B-5689 | <i>B. th.</i> B-5351 |
|-------------------------------|-----------------|------------------|----------------------|----------------------|
|                               | >80 г           | 11600 ± 1540a    | 13600 ± 3220a        | 20800 ± 4430b        |
|                               | 50–80 г         | 8020 ± 596a      | 9850 ± 1000b         | 10600 ± 1240b        |
|                               | <50 г           | 1670 ± 586a      | 810 ± 215b           | 1020 ± 124b          |
| Урожайность, ц/га             |                 | 234 ± 30a        | 235 ± 20a            | 317 ± 25b            |
| 2021 г.                       |                 |                  |                      |                      |
| Масса клубней<br>с делянки, г | Фракции клубней | H <sub>2</sub> O | <i>B. th.</i> B-5689 | <i>B. th.</i> B-5351 |
|                               | >80 г           | 6720 ± 1010a     | 10800 ± 798b         | 18300 ± 1380c        |
|                               | 50–80 г         | 6190 ± 800a      | 9800 ± 362b          | 8870 ± 900b          |
|                               | <50 г           | 2500 ± 346a      | 793 ± 68b            | 1020 ± 3b            |
| Урожайность, ц/га             |                 | 250 ± 196a       | 276 ± 25a            | 318 ± 23c            |

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

*B. thuringiensis* В-5351, заселяющий поверхность и внутренние ткани побегов картофеля, несмотря на меньшую инсектицидную активность, реализовал высокий биологический потенциал в качестве агента биоконтроля колорадского жука, вероятно, за счет длительного присутствия в надземной части растения, где осуществлялся контакт с вредителем, и защищенности от воздействия окружающей среды в качестве эндофита, в то время как штамм *B. thuringiensis* В-5689, проявлявший высокую инсектицидную активность против колорадского жука в лабораторных условиях и в малой степени заселяющий побеги картофеля, не оказал значительного влияния на урожайность и популяцию вредителя в полевых условиях. Таким образом, отправной точкой при поиске высокоэффективных штаммов бактерий для использования в сельском хозяйстве может быть тестирование их способности к эндофитному существованию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Clements J., Olson J.M., Sanchez-Sedillo B., Bradford B., Groves R.L. Changes in emergence phenology, fatty acid composition, and xenobiotic metabolizing enzyme expression is associated with increased insecticide resistance in the Colorado potato beetle // Arch. Insect Biochem. Physiol. 2020. V. 103. e21630. <https://doi.org/10.1002/arch.21630>
2. Benkovskaya G.V., Udalov M.B., Chusnutdinova E.K. Change in the polymorphism level in populations of the Colorado potato beetle // Rus. J. Genet. Appl. Res. 2010. V. 1 (5). P. 390–395. <https://doi.org/10.1134/S2079059711050157>
3. Kitaev K.A., Mardanshin I.S., Surina E.V., Leontieva T.L., Udalov M.B., Benkovskaya G.V. Modeling genetic processes underlying the development of resistance to fipronil in the populations of Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata* Say) // Rus. J. Genet. Appl. Res. 2017. V. 7. P. 36–45. <https://doi.org/10.1134/S2079059717010063>
4. Rondon S.I., Feldman M., Thompson A., Oppedisano T., Shrestha G. Identifying resistance to the Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata* Say) in potato germplasm: Review update // Front. Agron. 2021. V. 3. e642189. <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.642189>
5. Kadoić-Balaško M., Mikac K.M., Bažok R., Lemic D. Modern techniques in Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata* Say) control and resistance management: history review and future perspectives // Insects. 2020. V. 11. P. 581–593. <https://doi.org/10.3390/insects11090581>
6. Jouzani G.S., Valijanian E., Sharafi R. *Bacillus thuringiensis*: a successful insecticide with new environmental features and tidings // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2017. V. 101 (7). P. 2691–2711. <https://doi.org/10.1007/s00253-017-8175-y>
7. Güney G., Cedden D., Hänniger S., Heckel D.G., Coutu C., Hegedus D.D., Mutlu D.A., Suludere Z., Sezen K., Güney E., Toprak U. Silencing of an ABC transporter, but not a cadherin, decreases the susceptibility of Colorado potato beetle larvae to *Bacillus thuringiensis* ssp. tenebrionis Cry3Aa toxin // Arch. Insect Biochem. Physiol. 2021. V. 108 (2). e21834. <https://doi.org/10.1002/arch.21834>
8. Jalali E., Maghsoudi S., Noroozian E. Ultraviolet protection of *Bacillus thuringiensis* through microencapsulation with Pickering emulsion method // Sci. Rep. 2020. V. 10. e20633. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77721-8>
9. de Almeida J.R., Bonatelli M.L., Batista B.D., Teixeira-Silva N.S., Mondin M., dos Santos R.C., Bento J.M.S., de Almeida Hayashibara C.A., Azevedo J.L., Quecine M.C. *Bacillus thuringiensis* RZ2MS9, a tropical plant growth-promoting rhizobacterium, colonizes maize endophytically and alters the plant's production of volatile organic compounds during co-inoculation with *Azospirillum brasilense* Ab-V5 // Environ. Microbiol. Rep. 2021. V. 13. P. 812–821. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.13004>
10. Максимов И.В., Максимова Т.И., Сарварова Е.Р., Благова Д.К. Эндофитные бактерии как агенты для биопестицидов нового поколения // Прикл. биохим. и микробиол. 2018. Т. 54. № 2. С. 134–148. <https://doi.org/10.7868/S0555109918020034>
11. Sorokan A., Benkovskaya G., Burkhanova G., Blagov, D., Maksimov I. Endophytic strain *Bacillus subtilis* 26DCryChS producing CryIIa toxin from *Bacillus thuringiensis* promotes multifaceted potato defense against *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary and pest *Leptinotarsa decemlineata* Say // Plants. 2020. V. 9. e1115. <https://doi.org/10.3390/plants9091115>
12. Онина С.А., Козлова Г.Г., Минаева Н.Н., Панчихина Е.В., Усманов С.М. Исследование аналитических показателей почвы города Бирска и Бирского района Республики Башкортостан // Усп. совр. естествознания. 2018. № 6. С. 13–18.
13. Gassmann A.J. Resistance to Bt maize by western corn rootworm: effects of pest biology, the pest-crop interaction and the agricultural landscape on resistance // Insects. 2021. V. 12. A. 136. <https://doi.org/10.3390/insects12020136>
14. García-Suárez R., Verduzco-Rosas L.A., Ibarra J.E. Isolation and characterization of two highly insecticidal, endophytic strains of *Bacillus thuringiensis* // FEMS Microbiol. Ecol. 2021. V. 97. fiab080. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiab080>
15. Kandel S.L., Joubert P.M., Doty S.L. Bacterial endophyte colonization and distribution within plants // Microorganisms. 2017. V. 25. P. 77–91. <https://doi.org/10.3390/microorganisms5040077>
16. Azizoglu U. *Bacillus thuringiensis* as a biofertilizer and biostimulator: a mini-review of the little-known plant growth-promoting properties of Bt // Curr. Microbiol. 2019. V. 76. P. 1379–1385. <https://doi.org/10.1007/s00284-019-01705-9>
17. Laznik Ž., Tóth T., Lakatos T. Control of the Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata* [Say]) on potato under field conditions: a comparison of the effica-

- cy of foliar application of two strains of *Steinernema feltiae* (Filipjev) and spraying with thiametoxam // J. Plant Dis. Prot. 2010. V. 117. P. 129–135. <https://doi.org/10.1007/BF03356348>
18. Maltsev S.V. Efficiency of ethylene application on seed potato tubers // Sel'skokhozyaistvennaya Biol. 2021. V. 56. P. 44–53. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2021.1.44eng>

## Endophytic Strains of *Bacillus thuringiensis* for the Development of Means to Control the Number of the Colorado Potato Beetle in Potato Crops

A. V. Sorokan<sup>a, #</sup>, G. V. Benkovskaya<sup>a</sup>, I. S. Mardanshin<sup>b</sup>, V. Yu. Alekseev<sup>a</sup>,  
S. D. Rumyantsev<sup>a</sup>, and I. V. Maksimov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Biochemistry and Genetics — Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the RAS  
prosp. Oktyabrya 71, Ufa 450054, Russia*

<sup>b</sup>*Bashkir Institute of Agriculture — Subdivision of the Ufa Federal Research Center of the RAS  
ul. Richarda Sorge 19, Ufa 450059, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: fourtyanns@googlemail.com*

Currently, the search for *B. thuringiensis* strains to be used as biological control agents is based on their toxicity to insects in laboratory tests. At the same time, a number of strains of these bacteria are able to exist in symbiotic relationships with host plants, including being endophytes. The ability of *B. thuringiensis* strains to penetrate into the internal tissues of plants was evaluated by counting colony-forming units (CFU) of microorganisms 7 days after inoculation of sterile potato plants in test tubes; insecticidal activity was tested on larvae of the 3<sup>rd</sup> age obtained from overwintered adults of the Colorado beetle collected from fields in the Chishminsky and Iglinsky districts of Bashkortostan. It was shown that the strain of *B. thuringiensis* B-5351, which inhabits the surface ( $50.01 \pm 8.10 \text{ CFU} \times 10^5/\text{g}$ ) and internal tissues ( $38.92 \pm 9.62 \text{ CFU} \times 10^5/\text{g}$ ) of plant shoots, but has less insecticidal activity than the strain *B. thuringiensis* B-5689, which exhibits high insecticidal activity and colonizes mainly plant roots ( $25.37 \pm 3.82 \text{ CFU} \times 10^5/\text{g}$ ), reduced colonization of potato crops by the Colorado potato beetle, and also increased the yield of tubers in a 2-year experiment (2020–2021). Under the influence of *B. thuringiensis* B-5351, a decrease in the number of larvae of early age was observed, in contrast to *B. thuringiensis* B-5689, which caused longer metamorphosis processes. Apparently, the effect of *B. thuringiensis* B-5351 was the death of insects. It is important that processing *B. thuringiensis* B-5351 contributed to a significant decrease in the number of late-instar larvae on crops treated with this strain, as well as the degree of defoliation of plants by the pest, which was not observed with the action of *B. thuringiensis* B-5689. On plots treated with *B. thuringiensis* B-5351, the yield of commercial tubers and the total yield increased. A method is proposed for studying the endophytic potential of strains in relation to the terrestrial part of plants to search for biocontrol agents as a basis for creating algorithms for constructing microbiomes in agroecosystems.

**Keywords:** *Leptinotarsa decemlineata*, *Solanum tuberosum*, *Bacillus thuringiensis*, biocontrol, yield.

УДК 632.934.1:632.5/.7

## КРАЕВАЯ ОБРАБОТКА ПОЛЯ И ПОЛЕЗАЩИТНЫХ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ ОТ СОРНЯКОВ И ВРЕДИТЕЛЕЙ

© 2023 г. И. М. Киреев<sup>1</sup>, З. М. Коваль<sup>1,\*</sup>, М. В. Данилов<sup>2</sup><sup>1</sup> Новокубанский филиал «Росинформагротех»  
352243 Новокубанск, ул. Красная, 15, Россия<sup>2</sup> Ставропольский государственный аграрный университет  
355017 Ставрополь, Зоотехнический пер., 12, Россия

\*E-mail: zinakoval@mail.ru

Поступила в редакцию 03.02.2023 г.

После доработки 29.03.2023 г.

Принята к публикации 15.04.2023 г.

Предложена конструкция устройства к навесному штанговому опрыскивателю растений для краевой обработки поля основным способом опрыскивания сорняков и вредителей. Среднее число осажженных на поверхности капель на 1 см<sup>2</sup> на расстоянии до 15 м удовлетворяет агротехническим требованиям по применению гербицидов, а также инсектицидов и фунгицидов. По высоте расположения карточек на расстоянии 10 м от сопла число капель на 1 см<sup>2</sup> снижалось и в особенности при увеличении высоты их расположения от 69.7 до 17.5 и 31.7 шт./см<sup>2</sup>. На расстоянии от сопла 15 м капли были мелкими и на карточки практически не оседали. При движении технического средства 7.2 км/ч (2.0 м/с) суммарный массовый расход рабочей жидкости 2-х щелевых распылителей LU-04.AD-04 (код цвета — красный) и 2-х щелевых распылителей LU-02.AD-02, (код цвета — желтый) при давлении 4 Бар составлял 45.5 г/м погонный. На обработку 1 км лесополосы потребовалось 45.5 л рабочей жидкости. Например, емкости 600 л достаточно для краевой обработки по периметру поля протяженностью 13.2 км. Разработанное техническое средство позволит обеспечивать эффективную обработку полезащитных лесных насаждений от сорняков и вредителей.

**Ключевые слова:** штанговый опрыскиватель, сопло, вентилятор, струя, распылитель, воздушно-дисперсная система, сорняк, вредитель, полезащитные лесные насаждения.

**DOI:** 10.31857/S0002188123070062, **EDN:** OFUIHS

### ВВЕДЕНИЕ

В повышении плодородия почвы и урожайности растениеводческой продукции особое значение имеют полезащитные лесные полосы [1]. При этом основная задача состоит в выполнении профилактических мер и своевременной борьбе с таким опасным врагом, как зимующие в лесополосах вредителями зерновых культур, зернобобовых и других возделываемых культур. Высокую вредоносность вредители оказывают на молодые растения и, как следствие, сильно повреждают или уничтожают наибольшее количество растений. Например, в местах активного размножения вредителя недоборы зерна могут достигать 15 ц/га, в годы массового размножения от хлебных жуков теряют 20–30% урожая, нередко 50% и более. Значительный ущерб озимым колосовым культурам приносят насекомые, уничтожая листья или молодые растения целиком: за 1 сут один жук

способен уничтожить в среднем ~33 мг зерна, а за 10 сут — 25 зерен. При среднем уровне развития вредителя потери урожая могут составлять до 4–5 ц/га, при массовом — урожай может погибнуть полностью.

Особое место занимают виды, вредящие качеству продукции. Их роль иногда соизмерима с потерей урожая. Именно против таких вредителей часто ведутся необоснованные защитные мероприятия, которые приводят к нерациональным затратам и излишнему загрязнению продукции, а также к дополнительной экологической нагрузке на ценозы.

Кроме этого, технологические проходы и основания посадок являются зонами развития сорных растений, семена которых увеличенной скоростью ветра разносятся по прилегающим полям, увеличивая количество сорняков практически на всех полях.

Среди профилактических мер в интегрированной защите растений от вредителей, болезней и сорняков важное значение имеют технологии опрыскивания краевых участков полей от вредителей, зимующих в защитных лесополосах.

В системе интегрированной защиты растений возделываемых сельскохозяйственных культур от сорняков, вредителей и болезней [3–6] определенная роль принадлежит краевым обработкам полей, окруженных защитными лесополосами. Как правило, сплошные опрыскивания посевов чередуются с краевыми. При этом краевых обработок требуется много, особенно в период массового лёта вредителя. В это время необходимо применять краевые обработки, ведь фактически опрыскивать, например, цветоеда необходимо 5–7 раз. Установлено, что 2 краевые обработки заменяют одну сплошную и по сравнению со сплошной обработкой при этом затрачивается в среднем в 10 раз меньше материалов и средств. Рациональное использование химических, биологических и других методов защиты растений при этом позволяет не только отвести прямую угрозу, но и создать условия для деятельности полезных природных организмов. Химические мероприятия проводят примерно с середины мая до конца июня.

Анализ литературных источников в области краевых обработок полей и полезащитных лесных насаждений при борьбе с сорняками и вредителями установил следующее:

1 – опрыскиватели различных конструкций имеют общие основные узлы: бак (резервуар) для рабочей жидкости с мешалками, насос для подачи жидкости под давлением из бака к распылителям и для заправки бака рабочей жидкостью, распыливающее устройство, обеспечивающее дробление жидкости, нужное направление и форму струи. Имеются также вспомогательные узлы: рамы, передающие механизмы (редукторы), фильтры и др.;

2 – для небольших объемов работ часто используют разнообразные ручные или ранцевые опрыскиватели с механическим нагнетанием рабочей жидкости [7]. Поршень насоса служит одновременно воздушным колпаком, предварительное давление в котором создается после 6–7 качаний рукояткой ручного привода. При нажатии на ручку брандспойта открывается запорное устройство, рабочая жидкость под давлением поступает по шлангу к распылителю и выбрасывается наружу. Ранцевый лесной опрыскиватель включает заплечный резервуар из прорезиненной ткани с заливной горловиной и

сетчатым фильтром, ручной насос (гидропульт) и распылитель – брандспойт, соединенный с резервуаром гибким шлангом. Насос двойного действия состоит из 2-х трубок с ручками: наружная трубка – цилиндр насоса, внутренняя – шток поршня. Также известны ранцевые вентиляторные опрыскиватели типа “Штиль” (Stihl), которые оборудованы бензиновым мотором, приводящим в действие вентилятор. Над мотором размещен бак для рабочей жидкости емкостью 10 л, под мотором – бензобак на 1.5 л. Мощность двигателя в зависимости от модификации – 2.0–2.5 кВт. Дальность струи (факела) – 9.5–11.5 м по вертикали и 10.0–12.0 м по горизонтали. Данные опрыскиватели отличаются надежностью и удобством в работе.

Например, краевая обработка полей с растениеводческими культурами с применением ранцевых средств приведена на рис. 1а. Такая обработка весьма трудоемка, малопродуктивна, материально затратна и опасна для здоровья людей, привлекаемых в большом количестве. Нормы по опрыскиванию и расходу препаратов установить не представляется возможным. На рис. 1б показана аэрозольная обработка основания защитных лесополос с применением ранцевых опрыскивателей. Обработка основания лесополосы ранцевыми опрыскивателями имеет аналогичные недостатки.

Из разнообразных технических средств опрыскиватели сельскохозяйственного назначения отличаются по способу крепления и установки на энергетическое средство, виду распределительного устройства, степени распыления рабочей жидкости, назначению.

По способу установки различают следующие виды: навесные, прицепные, самоходные [8, 9]. Навесной опрыскиватель крепится на навеску трактора. Конструкция такого опрыскивателя предусматривает небольшой бак для рабочей жидкости – не более 600–800 л. Рабочий размах штанг не превышает 12–18 м. В штанговом навесном оборудовании распыление рабочей жидкости происходит под действием давления, создаваемого в системе. К преимуществам данного вида опрыскивателей можно отнести их ценовую характеристику (невысокая стоимость позволяет их приобретать даже самым малым хозяйствам), хорошую маневренность, возможность эксплуатации с тракторами отечественного производства. Навесные опрыскиватели рекомендуются применять в небольших фермерских хозяйствах, где площадь обрабатываемых сельскохозяйственных площадей не превышает 1000 га.



**Рис. 1.** Краевая обработка полей с растениеводческими культурами ручным способом с применением ранцевых средств (а), краевая обработка основания лесополосы ранцевыми опрыскивателями (б).



**Рис. 2.** Самоходный штанговый опрыскиватель в технологическом процессе краевой обработки полей от сорняков и вредителей.

По распределению жидкости в системе различают следующие типы: штанговые, вентиляторные. На рис. 2 показана работа современного самоходного штангового опрыскивателя в процессе краевой обработки полей от сорняков и вредителей.

В штанговом оборудовании распыление рабочей жидкости происходит под действием давления, создаваемого в системе. Применяют такие опрыскиватели для обработки полей. Недостатком краевого опрыскивания полей штанговым опрыскивателем является то, что по причине опасного контакта штанги с разросшейся лесопосадкой остается необработанной полоса до 5–6 м, на которой и в основании лесопосадки концентрируется большое количество вредителей. Из существующих технических средств для обработки полей защитных полос и лесных насаждений при борьбе против вредителей и болезней рекомендуется применять вентиляторные опрыскиватели, работающие от вала отбора мощности трактора.

Базовой моделью семейства навесных опрыскивателей является опрыскиватель навесной уни-

версальный ОН-400, который агрегируется с тракторами Т-30, Т-40АМ, Т-54В, МТЗ 50/52/80. Основные узлы опрыскивателя: полиэтиленовый бак, рама, трехпоршневый насос, пульт управления, карданная и цепная передачи, эжектор, рабочие органы. Бак заправляют рабочей жидкостью при помощи эжектора (самозаправка) или передвижных заправочных средств. Привод насоса осуществляется от вала отбора мощности трактора. Насос подает рабочую жидкость к гидромешалке и распылителям. Устройство опрыскивателя имеет штангу с плоскофакельными распылителями и 2 центробежных брандспойта. Емкость бака – 400 л, производительность в садах и лесных посадках – до 3 га/ч.

Опрыскиватель малообъемный безнасосный ОМБ-400 агрегируется с тракторами Т-30, Т-54В и МТЗ всех модификаций. Основные узлы: рама, бак из стеклопластика, цилиндрический двухступенчатый редуктор, карданная передача, центробежный вентилятор (распыливающее устройство). Выходной вал редуктора, на котором установлено колесо вентилятора и рас-



**Рис. 3.** Общий вид рабочего процесса опрыскивания лесополосы опрыскивателем центробежного принципа действия.

пылителя, — полый, по нему самотеком рабочая жидкость из бака поступает в распылитель, попадает в диск колеса вентилятора и воздушным потоком направляется на обрабатываемый объект. Емкость бака — 400 л, производительность — 2.2 га/ч.

Опрыскиватель вентиляторный садовый ОВС-А представляет собой одноосный прицеп на пневматических колесах. Основные узлы: рама с ходовой частью, бак, 2 поршневых насоса, силовой агрегат с редуктором и мешалкой, всасывающая и нагнетательная коммуникации, эжектор для самозаправки, вентиляторное распыливающее устройство и брандспойты. Привод рабочих органов — от вала отбора мощности трактора. Агрегатируется с тракторами ДТ-75, МТЗ всех модификаций. При опрыскивании насаждений высотой до 6 м используют двустороннее вентиляторное распыливающее устройство, для обработки более высоких деревьев вентилятор переводят в односторонний режим или отключают и используют брандспойты. Емкость бака — 1800 л, производительность до — 6 га/ч.

Для аэрозольной обработки садов и полезащитных лесных насаждений против вредителей и болезней применяются также опрыскиватель вентиляторный тракторный ОВТ-1А, опыливатель навесной универсальный ОШУ-50, опрыскиватель полевой ОП-450. На рис. 3 показана работа прицепного опрыскивателя, включающего емкость для рабочего раствора, центробежный вентилятор, приводящийся в действие от вала отбора мощности трактора МТЗ. Подача рабочего раствора осуществляется насосом из емкости объемом 200 л по магистрали к распылителям, расположенным внутри сопла с выходным сечением квадратной формы. На узкий воздушно-ка-



**Рис. 4.** Общий вид опрыскивателя “РОСА”.

пельный поток струи небольшой дальности действия влияет небольшой силы сносящий воздух. Опрыскиватель в принципе можно использовать для подачи капель в основание лесополосы. Однако недостатки обусловлены небольшим секундным объемом воздуха, выходящим из сопла вентилятора, не обеспечивающим дальность струи. Используемые для опрыскивания садов опрыскиватели с осевыми вентиляторами практически не используются при краевых обработках полей. Расчет дальности действия струи в инструкциях по эксплуатации не приводится.

Разработанный в последнее время для проведения работ по химзащите инсектицидами и фунгицидами садов, зернохранилищ и других территорий опрыскиватель “РОСА” вентиляторного типа рекомендуется применять также при химической обработке полей (рис. 4). Воздушный поток от лопастей вентилятора опрыскивателя “РОСА” воздействует на факелы распылителей рабочей жидкости, расположенные в 2 ряда. Закрученный воздушно-капельный поток утрачивает “память” начальных условий своего образования и дальность, подвержен случайному влиянию внешних условий.

Для опрыскивания полезащитных полос также рекомендуется применять аэрозольные генераторы. Генераторы отличаются по механическому и термомеханическому принципу действия. Ассортимент таких генераторов широк. Производительность по расходу рабочего раствора может составлять от 25 до 128 дм<sup>3</sup>/ч. Генераторы могут быть как мобильными (размещаются на спине оператора, например ранцевые опрыскиватели), так и высокопроизводительными, оснащенными колесами для транспортировки.



**Рис. 5.** Общий вид аэрозольной струи, создаваемой газотермическим генератором ГАРД, установленным в кузове автомобиля: (а) — аэрозольная струя направлена по движению автомобиля, (б) — аэрозольная струя направлена против движения автомобиля.



**Рис. 6.** Общий вид аэрозольной струи, создаваемой генераторами малой производительности, установленными в кузове автомобиля: (а) — газотермический генератор ГАРД — вид сзади слева, (б) — генератор холодного тумана Model 1200.

На рис. 5, 6 показаны аэрозольные струи, создаваемые аэрозольными генераторами применительно к краевым обработкам полей при защите посевов от вредителей сельскохозяйственных культур. ГАРД — это универсальное техническое средство для ликвидации массовых очагов распространения особо опасных вредителей, болезней и инфекций лесных массивов, полевых сельскохо-

зяйственных культур и закрытых помещений. Одним из недостатков применения аэрозольных генераторов является то, что взаимодействие аэрозольных струй с обрабатываемой поверхностью начинается на расстоянии, где проявляется гравитационное осаждение капель или облака в целом. В небольшой степени имеется возможность обработки лесополосы только при критическом



Рис. 7. Общий вид технического средства с устройством, оснащенным щелевыми соплами для краевой обработки поля.

наличии вредителей. В большинстве случаев обработка самой лесополосы не рекомендуется по причине обитания в ней птиц и полезных микроорганизмов (биообъектов).

Генератор тумана обеспечивает распыление препаратов, которые при столкновении с воздушным потоком, поставляемым компрессором, разбиваются на мелкодисперсную аэрозольную взвесь, напоминающую по консистенции туман. Этот способ обработки называется “холодным”, поскольку жидкости в процессе обработки не подвергаются нагреву, при котором преобразуются в пар, а распыляются при обычной температуре. “Холодные” генераторы можно применять на территориях или в помещениях, где имеются растения или животные. Частицы аэрозольных взвесей холодного тумана имеют больший размер, чем при использовании горячего тумана. Это снижает эффективность обработки, но попутно обеспечивает и ее большую безопасность. Применение авиационных средств неэффективно, т.к. листья лесопосадок являются “зонтиками” от проникновения аэрозоля во внутрь лесополосы.

Таким образом, известные методы и средства не в полной мере приспособлены для решения существующей проблемы по защите краевых участков полей от вредителей и не в полной мере соответствуют современным требованиям ресурсосберегающего, высокопроизводительного и экологического специфического применения. Они не универсальны по одновременному применению для краевых участков полей и оснований лесопосадок. Существующие методы и

средства не имеют достаточного научного обоснования для решения актуальной проблемы защиты растениеводческих культур от вредителей, находящихся в защитных лесополосах и наносящих значительный ущерб урожаю. Поэтому разработка комбинированного (универсального) и мобильного технического средства, позволяющего решать целевые задачи по уничтожению избирательного вида вредителя полевых культур с одновременной обработкой краевых участков полей и оснований лесополос, является весьма актуальной.

Цель работы — разработка технического средства для краевой обработки поля и полезащитных лесных насаждений от сорняков и вредителей.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения данной проблемы предложено использовать навесной к трактору Беларус-1025.2 штанговый опрыскиватель с шириной захвата штанги 12 м, оборудованный осевым вентилятором с соплом, имеющим круглое сопло, выходное сечение с установкой на нем широко применяемых щелевых распылителей для подачи факелов распыла с полидисперсной дисперсностью капель под углом к воздушной струе [10].

Техническое средство [10–12] с комплектом щелевых распылителей при комбинированной их установке по образующей сопла для подачи факелов распыливаемой жидкости под небольшим углом оси сопла в составе сельскохозяйственного агрегата Беларус 1025.2+ОН-12 показано на рис. 7.

Ось сопла установлена с наклоном к поверхности имитационной площадки  $20^\circ$  для увеличения дальности струи [12] и осаждения капель на карточках.

Оценка по обеспечению работоспособности технического средства, примененного в штанговом опрыскивателе для борьбы с сорняками и вредителями в ползащитных лесных насаждениях и при краевых обработках полей с осевым вентилятором и обоснованной конструкцией конического сопла технической системой штангового опрыскивателя, осуществлялась следующим образом.

В емкость опрыскивателя заливали воду, температура которой была равна  $23^\circ\text{C}$  [13]. В течение некоторого времени проводили процесс инжектирования капель факелов распыла жидкости щелевых распылителей воздушным потоком струи и их транспортирование в форме воздушно-дисперсной системы (рис. 8).

Вращение вентилятора обеспечивалось мотором от гидравлической системы технического средства. Производительность вентилятора с расходом воздуха  $22\,000\text{ м}^3/\text{ч}$  обеспечивала расход воздуха на выходе из конического сопла  $4.98\text{ м}^3/\text{с}$ . Скорость истечения воздуха измеряли анемометром, что составило  $29.3\text{ м/с}$ . Из емкости опрыскивателя, насосом с приводом от вала отбора мощности технического средства через распределитель с давлением на манометре 4 Бар массовый расход жидкости через сечения 4-х сопел LU-04AD-04 (код цвета – красный) составлял  $121\text{ г/с}$ . Массовые расходы капельной жидкости и воздуха в соотношении  $1 : 49.8$  исключали взаимодействие полидисперсных капель факелов распыла и обеспечивали их транспортирование в воздушном потоке. Различные размеры и скорости витания полидисперсных капель обуславливали их осаждение на целевых объектах за счет различных механизмов [14].

С учетом закономерности распространения струи [15] предметные карточки закрепляли скрепками на планшетах в перпендикулярном направлении на расстоянии 5 м от линии движения технического средства, учитывая комбинированное применение краевого опрыскивания и опрыскивания поля штанговыми распылителями. Расстояние передвижения технического средства в соответствии с требованиями принималось 60 м [13]. На таком расстоянии устанавливали режим функционирования опрыскивания и стабильную скорость движения технического средства, принятую  $7.2\text{ км/ч}$  ( $2\text{ м/с}$ ), контролируемые по показаниям стрелочного секундомера.



**Рис. 8.** Процесс инжектирования капель факелов распыла жидкости щелевых распылителей воздушным потоком струи и их транспортирование в форме воздушно-дисперсной системы.

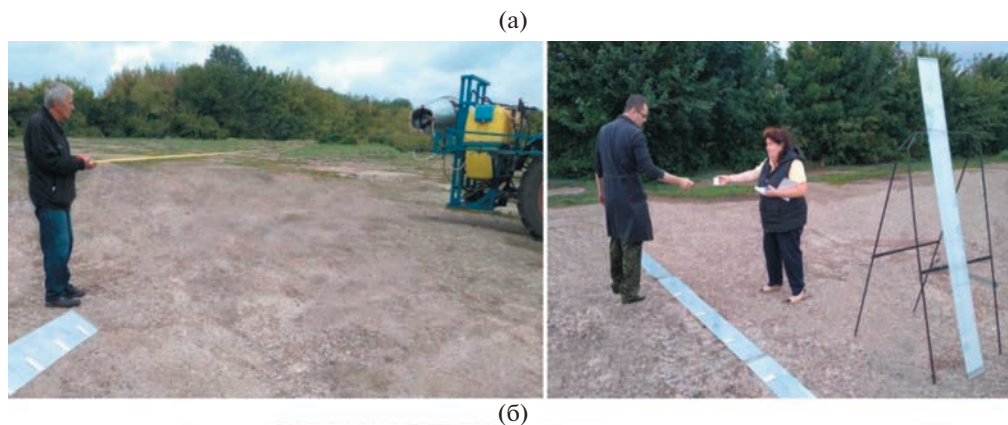
Для опрыскивания карточек применяли воду, подкрашенную красителем для принтера в соотношении  $1 : 9$ . После проведения опытов, пронумерованные предметные карточки  $5 \times 7\text{ см}$  [13] с отпечатками капель снимали с планшетов и закрепляли пронумерованные чистые. Карточки с отпечатками капель сканировали компьютерной программой ROv-03 и далее определяли классовые размеры капель.

Для исследований были выбраны щелевые распылители с соплами LU-015, AD-015, LU-02, AD-02, LU-03, AD-03 и LU-04. AD-04, которые при давлении жидкости  $3.5\text{--}4.0\text{ Бар}$  создают капли среднего размера  $127\text{--}218\text{ мкм}$  [16] и рекомендуются для послевсходовых обработок, а примененные жидкости включали гербициды, инсектициды и фунгициды.

Примененная норма гербицидов по числу капель/ $\text{см}^2$  составляла  $40 \leq N \leq 100$  шт. с диаметрами капель  $100 < D \leq 360\text{ мкм}$ . Норма при применении инсектицидов и фунгицидов:  $50 \leq N \leq 200$  шт. и  $80 < D \leq 360\text{ мкм}$  [13, 14, 17, 18]. Измерение расстояний и расположение планшетов с пронумерованными карточками на площадке показаны на рис. 9.

Перед началом проведения лабораторных исследований определяли: относительную влажность окружающего воздуха – по ГОСТ 20915 [16] с погрешностью  $\pm 2\%$  [16], температуру окружающего воздуха по ГОСТ 13646 [17] с погрешностью  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  [29], скорость ветра ( $\text{м/с}$ ), расход чистой воды через распылители ее сбором в емкости за 1 мин с применением поверенного секундомера и мерного цилиндра.

Опрыскивание карточек осуществлять рабочим раствором, температура которого была  $23^\circ\text{C}$  [13].



**Рис. 9.** Расположение планшетов с предметными карточками на площадке для получения информационных данных по дисперсности капель, создаваемых режимом технического средства: (а) — измерение расстояний рулеткой от сопла до начала расположения планшетов и расстановка карточек, (б) — расположение планшетов на площадке с предметными карточками.



**Рис. 10.** Процесс нанесения капель на карточки из воздушно-капельного потока.

Процесс нанесения капель на карточки воздушно-капельным потоком показан на рис. 10.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Представлены данные классовых размеров капель, осажденных на поверхности из воздушно-ка-

пельной системы в направлении ее распространения 2-мя щелевыми распылителями LU-04.AD-04 (код цвета — красный) и 2-мя щелевыми распылителями LU-02.AD-02, (код цвета — желтый) (табл. 1). В табл. 2 приведены данные осаждения классовых размеров капель из воздушно-капель-

**Таблица 1.** Классовые размеры капель, осаждаемые на поверхности из воздушно-капельной системы в направлении ее распространения 2-мя щелевыми распылителями LU-04.AD-04 (код цвета — красный) и 2-мя щелевыми распылителями LU-02.AD-02 (код цвета — желтый)

| №  | Средний диаметр капли, мкм |               |      | Средне взвешенный, мкм | Количество капель по диапазонам |               |      | Соотношение капель, % |               |      | Доля покрытия, % | Среднее число капель на 1 см <sup>2</sup> |
|----|----------------------------|---------------|------|------------------------|---------------------------------|---------------|------|-----------------------|---------------|------|------------------|-------------------------------------------|
|    | <150                       | от 150 до 300 | >300 |                        | <150                            | от 150 до 300 | >300 | <150                  | от 150 до 300 | >300 |                  |                                           |
| 1  | 80.3                       | 214           | 788  | 358                    | 578                             | 333           | 495  | 41.1                  | 23.7          | 35.2 | 5.7              | 40.2                                      |
| 2  | 74.2                       | 211           | 679  | 282                    | 943                             | 386           | 524  | 50.9                  | 20.8          | 28.3 | 5.8              | 52.9                                      |
| 3  | 74.4                       | 207           | 841  | 369                    | 1020                            | 465           | 679  | 47.0                  | 21.5          | 31.4 | 8.3              | 61.7                                      |
| 4  | 75.9                       | 209           | 976  | 443                    | 564                             | 259           | 503  | 42.5                  | 19.5          | 37.9 | 6.8              | 37.9                                      |
| 5  | 77.9                       | 212.4         | 834  | 389                    | 429                             | 233           | 411  | 40.0                  | 21.7          | 38.3 | 4.8              | 30.6                                      |
| 6  | 75.4                       | 208.1         | 881  | 436                    | 433                             | 207           | 395  | 41.8                  | 20.0          | 38.2 | 4.9              | 29.6                                      |
| 7  | 74.0                       | 220           | 778  | 411                    | 479                             | 183           | 461  | 42.6                  | 16.3          | 41.1 | 5.0              | 32.1                                      |
| 8  | 76.8                       | 219           | 729  | 361                    | 485                             | 317           | 486  | 37.7                  | 24.6          | 37.7 | 5.3              | 36.8                                      |
| 9  | 81.3                       | 214           | 742  | 352                    | 805                             | 507           | 706  | 39.9                  | 25.1          | 35.0 | 7.8              | 57.6                                      |
| 10 | 78.8                       | 213           | 827  | 399                    | 937                             | 639           | 967  | 36.8                  | 25.1          | 38.0 | 11.3             | 72.7                                      |
| 11 | 77.1                       | 214           | 777  | 416                    | 695                             | 447           | 906  | 33.9                  | 21.8          | 44.2 | 9.5              | 58.6                                      |
| 12 | 77.9                       | 214           | 770  | 367                    | 872                             | 514           | 842  | 39.1                  | 23.0          | 37.8 | 9.4              | 63.6                                      |
| 13 | 78.9                       | 215           | 693  | 341                    | 821                             | 516           | 807  | 38.3                  | 24.0          | 37.6 | 8.5              | 61.3                                      |
| 14 | 76.6                       | 216           | 663  | 282                    | 658                             | 393           | 458  | 43.6                  | 26.0          | 30.4 | 5.1              | 43.1                                      |
| 15 | 77.1                       | 207           | 586  | 206                    | 791                             | 340           | 267  | 56.6                  | 24.0          | 19.1 | 3.5              | 39.9                                      |
| 16 | 74.9                       | 210           | 552  | 227                    | 824                             | 445           | 412  | 49.0                  | 26.0          | 24.5 | 4.4              | 48.3                                      |
| 17 | 75.3                       | 210           | 537  | 213                    | 887                             | 372           | 381  | 54.1                  | 23.0          | 23.2 | 4.1              | 46.8                                      |
| 18 | 73.8                       | 210           | 496  | 171                    | 764                             | 301           | 195  | 60.7                  | 24.0          | 15.5 | 2.7              | 35.9                                      |

**Таблица 2.** Классовые размеры капель, осаждаемые из воздушно-капельной системы на карточках по высоте их расположения в направлении ее распространения 2-мя щелевыми распылителями LU-04.AD-04 (код цвета — красный) и 2-мя щелевыми распылителями LU-02.AD-02 (код цвета — желтый)

| Карточка, № | Средний диаметр капли, мкм |               |      | Средне взвешенный, мкм | Количество капель по диапазонам |               |      | Соотношение капель, % |               |      | Доля покрытия, % | Среднее число капель на 1 см <sup>2</sup> |
|-------------|----------------------------|---------------|------|------------------------|---------------------------------|---------------|------|-----------------------|---------------|------|------------------|-------------------------------------------|
|             | <150                       | от 150 до 300 | >300 |                        | <150                            | от 150 до 300 | >300 | <150                  | от 150 до 300 | >300 |                  |                                           |
| 127         | 77.2                       | 212           | 1430 | 720                    | 1324                            | 662           | 1660 | 36.3                  | 18.2          | 45.5 | 28.3             | 104.2                                     |
| 128         | 73.9                       | 211           | 2220 | 1180                   | 1201                            | 546           | 1777 | 34.1                  | 15.5          | 50.4 | 44.5             | 100.7                                     |
| 129         | 73.7                       | 213           | 1950 | 974                    | 1377                            | 675           | 1794 | 35.8                  | 17.6          | 46.6 | 40.5             | 109.9                                     |
| 130         | 77.9                       | 212           | 788  | 356                    | 984                             | 618           | 838  | 40.3                  | 25.3          | 34.3 | 9.5              | 69.7                                      |
| 131         | 76.7                       | 205           | 857  | 313                    | 311                             | 139           | 163  | 50.7                  | 22.7          | 26.6 | 2.4              | 17.5                                      |
| 132         | 75.8                       | 214           | 689  | 296                    | 512                             | 256           | 341  | 46.2                  | 23.1          | 30.7 | 3.9              | 31.7                                      |
| 133         | 71.8                       | 211           | 490  | 133                    | 136                             | 42            | 15   | 70.5                  | 21.8          | 7.8  | 0.6              | 0.6                                       |
| 134         | 69.2                       | 214           | 550  | 157                    | 71                              | 25            | 13   | 65.1                  | 22.9          | 11.9 | 0.5              | 3.1                                       |
| 135         | 76.7                       | 205           | 500  | 186                    | 118                             | 36            | 39   | 61.1                  | 18.7          | 20.2 | 0.7              | 5.5                                       |

Примечание. Карточки № 127–129 — высота 62 см, № 130–132 — высота 115 см, № 133–135 — высота 172 см.

ной системы на карточках по высоте их расположения на возвышениях в направлении ее распространения и показатели дисперсности капель на 1 см<sup>2</sup> на расстоянии 5 м от сопла по высоте распо-

ложения карточек с повышенным их количеством. На расстоянии 10 м от сопла число капель на 1 см<sup>2</sup> снижалось и в особенности при увеличении высоты их расположения от 69.7 до 17.5 и

31.7 шт./см<sup>2</sup>. На расстоянии от сопла 15 м капли мелкие и на карточки практически не оседали. Число капель на карточках в диапазонах <150 мкм, от 150 до 300 мкм и >300 мкм с увеличением расстояния до 15 м от технического средства снижалось. На расстоянии 5 м от технического средства число капель на карточках по высоте их расположения для всех диапазонов практически было постоянным. Процентное соотношение капель размером >300 мкм по высоте расположения карточек составляло 45.5, 50.4 и 46.6%, капель размером <150 мкм — 36.3, 34.1 и 35.8%, капель размером от 150 до 300 мкм — 18.2, 15.5 и 17.6%. На расстоянии 10 м от технического средства процентное соотношение капель по высоте распределялось иначе. Капли размером <150 мкм — 40.3, 50.7 и 46.2%, капли размером >300 мкм — 34.3, 26.6 и 30.7%, капли размером от 150 до 300 мкм — 25.3, 22.7 и 23.1%. На расстоянии 15 м от технического средства процентное соотношение капель по высоте распределения менялось также по-другому: капли размером <150 мкм — 70.5, 65.1 и 61.1%, капли размером от 150 до 300 мкм — 21.8, 22.9 и 18.7%, капли размером >300 мкм — 7.8, 11.9 и 20.2%.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при движении технического средства со скоростью 7.2 км/час (2 м/с) суммарный массовый расход рабочей жидкости распылителей при давлении 4 Бар составлял 45.5 г/м погонный. На обработку 1 км лесополосы требуется 45.5 л жидкости. Жидкости, например, в емкости 600 л достаточно для краевой обработки по периметру поля протяженностью 13.2 км.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Примаков Н.В., Латифова А.С., Дубровин Е.Ю.* Эффективность конструкции ползащитных лесных насаждений Краснодарского края // Усп. совр. естествознания. 2022. № 10. С. 41–45. <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=37905> (дата обращения: 01.02.2023).
2. *Бурак Л.В., Зленко Л.В., Бакшеева Е.О.* Сорняки и методы борьбы с ними: альбом для студентов. Красноярск: СибГАУ, 2017. 85 с.
3. *Ганиев М.М., Недорезков В.Д.* Химические средства защиты растений. Учеб. пособ. М.: Колос, 2006. 248 с.
4. *Дмитренко В.Л.* Экологическая эффективность ползащитных лесных полос. // Лесн. хоз-во. № 8. 1981. С. 38–40.
5. *Тузов В.К., Калининченко Э. М., Рябинков В.А.* Методы борьбы с болезнями и вредителями леса. М.: ВНИИЛМ, 2003. 72 с.
6. *Щебланов В.Ю., Крюкова Е.А.* Система мероприятий по борьбе с вредителями и болезнями в защитных лесонасаждениях и лесных питомниках. М.: Колос, 1977. 33 с.
7. *Опрыскиватели ранцевые садовые* [Электр. ресурс]. [https://www.vseinstrumenti.ru/sadovaya\\_tehnika/opryskivateli/rancevye/](https://www.vseinstrumenti.ru/sadovaya_tehnika/opryskivateli/rancevye/) (дата обращения 26.07.2022).
8. *Степук Л.Я., Дашков В.Н., Петровец В.Р.* Машины для применения средств химизации в земледелии: конструкция, расчет, регулировки: учеб. пособ. Минск: Дикта, 2006. 448 с.
9. *Никитин Н.В., Спиридонов Ю.Я., Шестаков В.Г.* Научно-практические аспекты технологии применения современных гербицидов в растениеводстве / Под ред. Ю.Я. Спиридонова, В.Г. Шестакова М.: Печатный Город, 2010. 189 с.
10. *Киреев И.М., Коваль З.М.* Устройство к штанговому опрыскивателю растений для борьбы с сорняками и вредителями в ползащитных лесных насаждениях и при краевой обработке поля. Пат. на полезную модель № 210868, РФ // Б.И. 2021. Дата подачи заявки 30.07.2021.
11. *Kireev I., Koval' Z., Danilov M.* Application of slot liquid nozzles in a technical means for edge treatment of field // Inter. Conf. Modern Trends in Manufacturing Technol. and Equip. 2021. AIP Conf. Proc. 2503. 030032-1–030032-5. <https://doi.org/10.1063/5.0099393>
12. *Киреев И.М., Данилов М.В. Коваль З.М., Зимин Ф.А.* Аэрозольная технология краевой обработки поля для уничтожения сорняков и вредителей / Изв. сел.-хоз. науки Тавриды. 2022. № 3(31).
13. ГОСТ 34630-2019. Техника сельскохозяйственная. Машины для защиты растений. Опрыскиватели. Методы испытаний. Введ. 2021.15.03. М.: Стандартинформ, 2020. 38 с.
14. *Веретенников Ю.М., Лысов А.К.* Как отрегулировать опрыскиватель, проверить качество опрыскивания? // Защита растений. 1993. № 9. С. 48–51.
15. *Абрамович Г.Н., Гиришвич Т.А., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н., Смирнова И.П.* Теория турбулентных струй / Под ред. Г.Н. Абрамовича. М: Наука, 1984. 717 с.
16. ГОСТ 20915-2011 Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний. М.: Стандартинформ, 2013. 28 с.
17. ГОСТ 13646-68 Термометры стеклянные ртутные для точных измерений. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1970. 10 с.
18. *Киреев И.М.* Результаты испытаний различных конструкций щелевых распылителей опрыскивателей // Техн. и оборуд. для села. 2011. № 2. С. 28–29.

## Edge Treatment of the Field and Field-Protective Forest Plants from Weeds and Pests

I. M. Kireev<sup>a</sup>, Z. M. Koval<sup>a,#</sup>, and M. V. Danilov<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Novokubansk branch "Rosinformagrotekh"  
ul. Krasnaya 15, Novokubansk 352243, Russia

<sup>b</sup> Stavropol State Agrarian University  
Zootekhichesky per. 12, Stavropol 355017, Russia

<sup>#</sup>E-mail: zinakoval@mail.ru

The design of the device for a hinged rod sprayer of plants for edge processing of the field by the main method of spraying of litter and pests is proposed. The average number of droplets deposited on the surface per 1 cm<sup>2</sup> at a distance of up to 15 m meets the agrotechnical requirements for the use of herbicides, as well as insecticides and fungicides. According to the height of the cards at a distance of 10 m from the nozzle, the number of drops per 1 cm<sup>2</sup> decreased, and especially with an increase in the height of their location from 69.7 to 17.5 and 31.7 pcs/cm<sup>2</sup>. At a distance of 15 m from the nozzle, the droplets were small and practically did not settle on the cards. When the vehicle is moving 7.2 km/h (2.0 m/s), the total mass flow of the working fluid of 2 slot sprayers LU-04.AD-04 (color code — red) and 2 slot sprayers LU-02.AD-02, (color code — yellow) at a pressure of 4 The bar was 45.5 g/m linear. It took 45.5 liters of working fluid to work 1 km of the forest belt. For example, a capacity of 600 liters is sufficient for edge processing along the perimeter of a field with a length of 13.2 km. The developed technical means will ensure the effective treatment of protective forest plantations from weeds and pests.

**Keywords:** rod sprayer, nozzle, fan, jet, sprayer, air-dispersed system, weed, pest, protective forest plantations.

УДК 632.118.3:632.122.1(470.315)

# МОНИТОРИНГ $^{137}\text{Cs}$ , $^{90}\text{Sr}$ И $^{40}\text{K}$ В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ И РАСТЕНИЯХ РЕПЕРНЫХ УЧАСТКОВ ИВАНОВСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2023 г. А. А. Уткин<sup>1,\*</sup>, Н. И. Аканова<sup>2</sup>, И. Б. Нода<sup>3</sup><sup>1</sup> Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. Д.К. Беляева  
153012 Иваново, ул. Советская, 45, Россия<sup>2</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова  
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия<sup>3</sup> Станция агрохимической службы “Ивановская”  
153506 Ивановская обл., с. Богородское, ул. Центральная, 8, Россия

\*E-mail: aleut@inbox.ru

Поступила в редакцию 30.01.2023 г.

После доработки 27.02.2023 г.

Принята к публикации 15.04.2023 г.

Представлены результаты радиационного мониторинга дерново-подзолистых почв реперных участков сельскохозяйственного назначения Ивановской обл., проведенного в 2014 и 2021 г. Установлены фоновые величины удельных активностей исследованных радионуклидов в почвах реперных участков. По плотности загрязнения пахотного горизонта почв  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  был определен уровень экологической обстановки, что позволило отнести почвы всех реперных участков области к незагрязненным территориям, пригодным без ограничений для сельскохозяйственного использования. Определены мощность экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения почв и вклад  $^{40}\text{K}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в формирование  $\gamma$ -фона почв. Корреляционным анализом определены влияние отдельных физико-химических свойств почв на поведение и распределение радионуклидов в почве и взаимосвязи между содержанием самих радионуклидов. Исходя из величин удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в растительной продукции, выращенной в 2014 и 2021 г., были построены ряды культурных растений с убывающей способностью к накоплению из почвы данных радионуклидов. Вся выращенная растительная продукция всех видов культур полностью удовлетворяла ветеринарным нормативам, предъявляемым к ограничению содержания  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в растительных кормах (зеленой массе, соломе и фуражном зерне). Рассчитаны коэффициенты накопления и перехода  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  из почвы в растения. Коэффициенты линейной корреляции между величинами удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в почвах и растениях позволили выявить силу и характер этих зависимостей.

**Ключевые слова:** радиационный мониторинг,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{40}\text{K}$ , дерново-подзолистая почва, растения, реперные участки, Ивановская обл.

**DOI:** 10.31857/S0002188123070116, **EDN:** OGIFAF

## ВВЕДЕНИЕ

Почвы являются основным “депо” поступающих в них различных токсикантов, в т.ч. и искусственных радионуклидов (ИРН), которые могут в больших количествах накапливаться в растительной продукции, поступать с ней в организмы сельскохозяйственных животных и человека. Основное загрязнение почв и культурных растений агроценозов в России связано с долгоживущими ИРН:  $^{137}\text{Cs}$  ( $T_{1/2} = 30.17$  лет) и  $^{90}\text{Sr}$  ( $T_{1/2} = 28.79$  лет) [1].

Почвы, как природные объекты, сформированные при эволюции нашей планеты, также могут содержать в себе и естественные радионуклиды (ЕРН), которые определяют природный радиационный фон почв [2]. К числу наиболее

широко распространенных ЕРН в почвах относится  $^{40}\text{K}$ , с периодом полураспада  $T_{1/2} = 1.28 \times 10^9$  лет [1].

В Ивановской обл., как в развивающемся аграрном регионе, расположенном в центре европейской части России, распространены дерново-подзолистые почвы, доля которых в почвенном покрове пахотных земель области составляет 92% [3], на которых возделывают широкий набор сельскохозяйственных культур. В научной литературе источники поступления и особенности накопления  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{40}\text{K}$  дерново-подзолистыми почвами и растениями в почвенно-климатических условиях Ивановской обл. остаются слабо

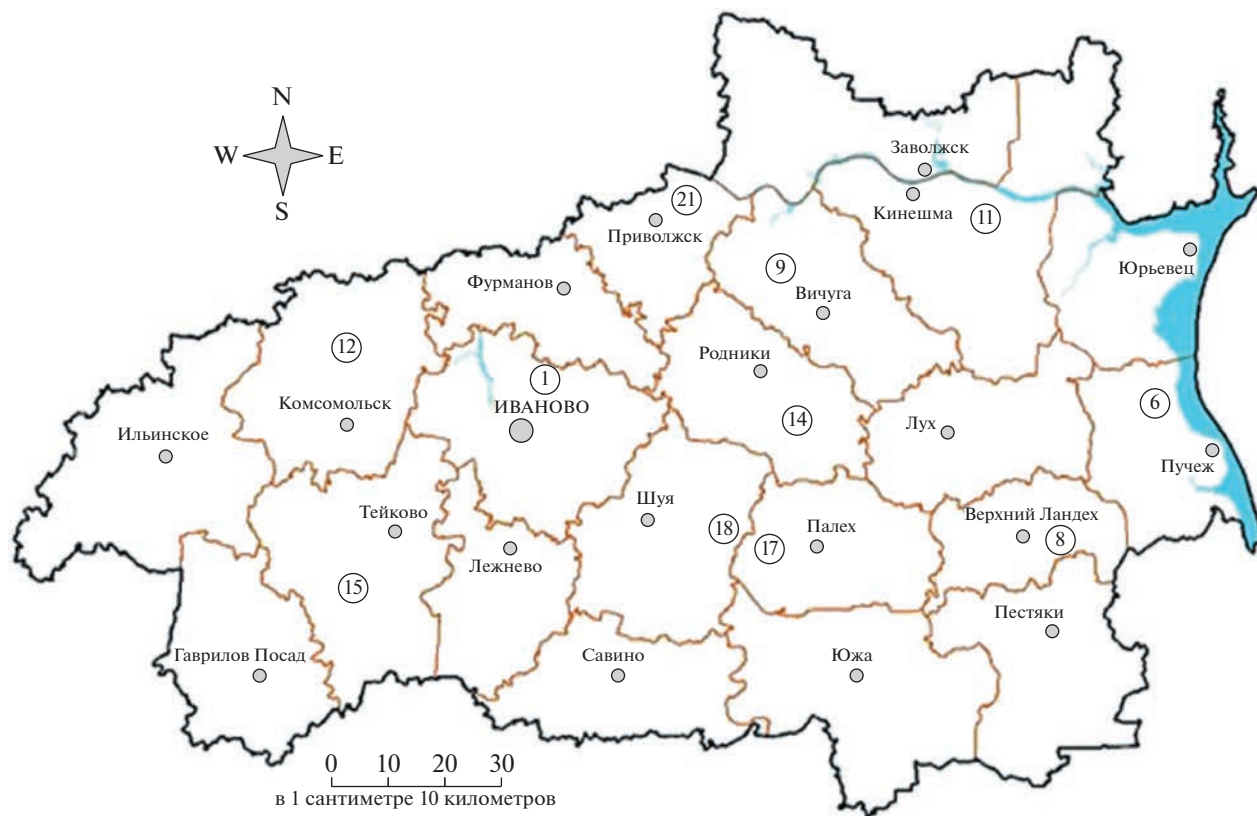


Рис. 1. Карта Ивановской области: числами обозначены номера реперных участков.

изученными по сравнению с почвами других регионов России [4, 5].

Цель работы – проведение локального радиационного мониторинга дерново-подзолистых почв реперных участков сельскохозяйственных угодий Ивановской обл. на наличие содержания в них  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{40}\text{K}$ , определение влияния отдельных физико-химических свойств почв на поведение изученных радионуклидов (РН) в системе почва–растение, возможности получения безопасной растительной продукции, соответствующей ветеринарным нормативам.

Комплексную оценку современного уровня  $\gamma$ -излучения и содержания  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{40}\text{K}$  в дерново-подзолистых почвах и культурных растениях агроценозов Ивановской обл. проводили впервые. Данные, полученные в ходе проведенного мониторинга, в научной литературе ранее не находили своего глубокого изучения и освещения, что повышает ценность и актуальность проведенного исследования.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Агрохимическое и радиологическое обследование почв реперных участков и культурных рас-

тений на содержание  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{40}\text{K}$  проводили в 2014 и 2021 г. в соответствии с ежегодным локальным мониторингом почв земель сельскохозяйственного назначения на 11 реперных участках, занятых дерново-подзолистыми почвами, расположенных в отдельных районах Ивановской обл. (рис. 1), путем отбора образцов растений и почв из пахотного горизонта (0–20 см) для анализов. Общая площадь дерново-подзолистых почв реперных участков – 207,7 га. Реперные участки в основном не имели уклона и располагались на пахотных землях и кормовых естественных угодьях. Преобладающая растительность участков – культурные растения: овес посевной (*Avena sativa* L.), клевер розовый (*Trifolium hybridum* L.), тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L.), пшеница мягкая (*Triticum aestivum* L.), ячмень обыкновенный (*Hordeum vulgare* L.) и злаковое разнотравье преимущественно в виде полевицы собачьей (*Agrostis canina* L.), мятлика лугового (*Poa pratensis* L.) и щучки дернистой (*Deschampsia cespitosa* L.).

С отдельного реперного участка в зависимости от его площади с помощью тростьевого бура отбирали несколько смешанных образцов почвы. Один смешанный образец массой ~0,5 кг составляли из 25–30 точечных проб и в среднем отбира-

ли с каждых 6–7 га площади реперного участка. Смешанную пробу растений массой около 0.5 кг натуральной влажности составляли из 8–10 точечных проб. Пробы почв и растений отбирали с одних и тех же локаций реперных участков. Отобранные образцы почв и растений высушивали до воздушно-сухого состояния и измельчали на мельнице.

Физико-химические анализы почв были выполнены по следующим методикам: обменная кислотность ( $\text{pH}_{\text{KCl}}$ ) – ГОСТ Р 58594-2019, содержание обменных оснований кальция и магния (**Ca** и **Mg**) – ГОСТ 26487-85, органическое вещество ( $\text{C}_{\text{орг}}$ ) (по Тюрину в модификации ЦИНАО) – ГОСТ 2621391, сумма поглощенных оснований (**S**) (по Каппену) – ГОСТ 27821-88, фракции физической глины и ила – по Качинскому [5].

Определение изученных РН производили на приборе УСК “Гамма Плюс” (Россия) в счетных образцах на сцинтилляционном гамма-, бета-спектрометре с использованием программного обеспечения “Прогресс” (ВНИИФТРИ, 2003).

Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в почве и  $^{90}\text{Sr}$  в почве и растительных образцах определяли согласно методическим рекомендациям [6],  $^{137}\text{Cs}$  в растительной продукции – по ГОСТ Р 54040-2010. Гамма-спектрометрию проб почвы проводили в геометрии сосуда Маринелли объемом 1 л. Растительные образцы на определение  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  предварительно озоляли (концентрировали более чем в 10 раз), после чего золу помещали в чашки Петри ( $^{137}\text{Cs}$ ) и измерительные кюветы ( $^{90}\text{Sr}$ ). Для получения данных по удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в растительных образцах значительно увеличивалось время экспозиции до 2–5 ч и более.

Измерение МЭД  $\gamma$ -излучения проводили по методическим указаниям по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения [7]. МЭД  $\gamma$ -излучения измеряли в полевых условиях на высоте 1 м над поверхностью почвы радиометром СРП-68-01. На каждом участке проводили 8 замеров, с последующим подсчетом среднего показателя.

Для оценки перехода ИРН из почвы в растения рассчитывали коэффициент накопления ( $K_{\text{н}}$ ), равный отношению удельной активности ИРН в растениях (Бк/кг сухой массы) к его активности в почве (Бк/кг сухой массы). Коэффициент перехода ( $K_{\text{п}}$ ) определяли как отношение удельной активности ИРН в растениях (Бк/кг сухой массы) к плотности загрязнения почвы на единицу площади (кБк/м<sup>2</sup>).

При статистической обработке данных проводили проверку закона нормального распределения с помощью критерия Шапиро–Уилка ( $p > 0.05$ ). Средние величины изученных показателей в исследованных образцах при нормальном распределении сравнивали между собой с помощью 2-х выборочного  $t$ -критерия Стьюдента для зависимых переменных ( $p < 0.05$ ), при ненормальном – критерия Вилкоксона ( $p < 0.05$ ). Для выявления взаимосвязей при нормальном распределении признака рассчитывали коэффициенты парной линейной корреляции Пирсона, при ненормальном – коэффициенты ранговой корреляции Спирмена с использованием статистической программы “Statistica” (версия 10).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Накопление, распределение и миграция радионуклидов в почвах зависят от многих факторов, среди которых прежде всего большое значение имеют содержание органического вещества и его качественный состав, кислотность почвенной среды, химический и гранулометрический составы, характер увлажнения и рельеф местности [8].

Для изучения влияния физико-химических показателей почв на особенности поведения в них РН было проведено обследование дерново-подзолистых почв реперных участков, его результаты приведены в табл. 1.

Согласно градации распределения глинистых частиц почвы, большинство участков имели супесчаный и легкосуглинистый гранулометрический состав. Средние величины обеспеченности почв участков  $\text{C}_{\text{орг}}$  в 2014 и 2021 г. соответствовали низкому уровню обеспеченности. За период наблюдения средняя величина обменной кислотности почв участков снизилась на 0.2 ед.

Дерново-подзолистые почвы большинства участков с 2014 по 2021 г. преимущественно имели среднюю и повышенную степень обеспеченности обменными Са и Mg соответственно. С 2014 г. среднее содержание Са и Mg увеличилось на 1.5 и 26.1% соответственно, но тем не менее, продолжало соответствовать средней и повышенной степеням обеспеченности основаниями.

Средняя доля присутствия обменных Са и Mg в общем составе поглощенных катионов в 2014 и 2021 г. составляла 63.4% (lim = 38.2–92.4%) и 58.6% (lim = 22.8–97.7%) соответственно, что свидетельствовало о важной роли этих элементов в процессах химизма дерново-подзолистых почв Ивановской обл. Показатели суммы поглощенных оснований (параметр **S**) почв большинства реперных участков соответствовали повышен-

**Таблица 1.** Физико-химические свойства пахотного слоя дерново-подзолистых почв реперных участков

| Реперный участок, №* | Число смешанных образцов, <i>n</i> | Район              | Фракция (мм), %** |            | $C_{орг}$ , %                 | $pH_{KCl}$                    | Ca                            | Mg                            | <i>S</i>                        |
|----------------------|------------------------------------|--------------------|-------------------|------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
|                      |                                    |                    | <0.001            | <0.01      |                               |                               |                               |                               |                                 |
| 1                    | 2                                  | Ивановский         | 4.8               | 18.3       | <u>2.1</u><br>2.0             | <u>5.2</u><br>5.8             | <u>5.9</u><br>5.0             | <u>2.1</u><br>2.5             | <u>11.8</u><br>10.8             |
| 6                    | 2                                  | Пучежский          | 2.0               | 9.3        | <u>2.1</u><br>1.7             | <u>5.6</u><br>6.3             | <u>7.9</u><br>4.6             | <u>2.6</u><br>2.8             | <u>10.7</u><br>9.1              |
| 8                    | 3                                  | Верхнеландеховский | 3.5               | 16.0       | <u>1.9</u><br>1.6             | <u>5.0</u><br>5.5             | <u>8.4</u><br>4.4             | <u>2.3</u><br>1.7             | <u>12.5</u><br>8.2              |
| 9                    | 4                                  | Вичугский          | 3.0               | 14.1       | <u>2.3</u><br>2.1             | <u>6.1</u><br>6.2             | <u>7.9</u><br>7.6             | <u>2.5</u><br>3.4             | <u>27.9</u><br>27.6             |
| 11                   | 2                                  | Кинешемский        | 5.5               | 25.0       | <u>2.4</u><br>2.2             | <u>5.5</u><br>5.9             | <u>4.4</u><br>9.4             | <u>1.8</u><br>3.5             | <u>16.0</u><br>16.2             |
| 12                   | 5                                  | Комсомольский      | 5.7               | 20.0       | <u>2.1</u><br>2.1             | <u>6.2</u><br>6.2             | <u>8.5</u><br>5.1             | <u>2.8</u><br>2.8             | <u>17.0</u><br>20.7             |
| 14                   | 3                                  | Родниковский       | 5.2               | 31.0       | <u>1.8</u><br>2.0             | <u>5.1</u><br>5.4             | <u>6.1</u><br>7.9             | <u>1.9</u><br>3.0             | <u>12.2</u><br>11.8             |
| 15                   | 4                                  | Тейковский         | 2.3               | 9.0        | <u>2.0</u><br>2.5             | <u>6.5</u><br>6.2             | <u>7.6</u><br>5.1             | <u>2.8</u><br>2.1             | <u>16.8</u><br>9.9              |
| 17                   | 4                                  | Палехский          | 3.3               | 16.3       | <u>2.2</u><br>3.0             | <u>6.0</u><br>6.8             | <u>5.5</u><br>7.6             | <u>2.3</u><br>2.0             | <u>12.5</u><br>19.4             |
| 18                   | 4                                  | Шуйский            | 4.9               | 16.2       | <u>3.1</u><br>3.0             | <u>5.7</u><br>5.7             | <u>4.6</u><br>8.4             | <u>2.2</u><br>3.6             | <u>17.2</u><br>0.3              |
| 21                   | 3                                  | Приволжский        | 5.1               | 19.9       | <u>2.8</u><br>2.6             | <u>6.4</u><br>6.5             | <u>6.2</u><br>8.7             | <u>2.6</u><br>4.0             | <u>38.6</u><br>30.8             |
| <i>M ± m</i>         |                                    |                    | 4.1 ± 0.4         | 17.7 ± 1.9 | <u>2.3 ± 0.1</u><br>2.3 ± 0.1 | <u>5.8 ± 0.2</u><br>6.0 ± 0.1 | <u>6.6 ± 0.4</u><br>6.7 ± 0.6 | <u>2.3 ± 0.1</u><br>2.9 ± 0.2 | <u>17.6 ± 2.5</u><br>16.8 ± 2.3 |

Примечания. 1. *M* — среднее арифметическое, *m* — ошибка среднего арифметического В таблице приведены средние арифметические. То же в табл. 2—4. 2. Над чертой — 2014 г., под чертой — 2021 г. То же в табл. 2—4.

\*Нумерация реперных участков та же в табл. 2—4.

\*\*Определяли на момент закладки почвенного разреза.

ным степеням обеспеченности. Средняя величина *S* почв участков за период наблюдений уменьшилась на 0.8 смоль(экв)/100 г почвы.

Отметим, что варьирование всех физико-химических показателей дерново-подзолистых почв участков подчинялось закону нормального распределения. Величины критерия Шапиро—Уилка удовлетворяли условию  $p > 0.05$ .

Сравнение физико-химических показателей почв по 2-м аналогичным зависимым выборкам 2014 и 2021 г. показало, что существенные различия отличались только для  $pH_{KCl}$ , это подтверждено расчетом величин *t*-критерия Стьюдента ( $p < 0.05$ ).

Результаты определения удельной активности ЕРН позволили дать более точную характеристику радиационной обстановки исследованной тер-

ритории путем сравнения их удельных активностей в изученных почвах с их общемировыми или региональными показателями, а ИРН — со среднестатистическим их содержанием в почвах, обусловленном глобальными выпадениями. Удельные активности  $^{137}Cs$ ,  $^{90}Sr$  и  $^{40}K$  в почвах участков представлены в табл. 2.

Удельные активности  $^{40}K$  в почвах Земли варьируют в широких диапазонах, в качестве среднемирового принята величина 450 Бк/кг почвы. По данным Тихомирова [10], содержание  $^{40}K$  в дерново-подзолистых почвах России в среднем составляет 360 Бк/кг. Средняя удельная активность  $^{40}K$  в дерново-подзолистых почвах реперных участков Ивановской обл. за период мониторинга была в 1.12–1.14 раза больше фоновой величины.

**Таблица 2.** Мощность экспозиционной дозы, удельная активность и плотность загрязнения почв  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{40}\text{K}$ 

| Реперный<br>участок, № |               |                    | $^{90}\text{Sr}$ |                    | $^{40}\text{K}$ |                    | МЭД            |
|------------------------|---------------|--------------------|------------------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------|
|                        | Бк/кг         | Ки/км <sup>2</sup> | Бк/кг            | Ки/км <sup>2</sup> | Бк/кг           | Ки/км <sup>2</sup> | мкР/ч          |
| 1                      | 7.4           | 0.052              | 3.5              | 0.025              | 408             | 2.87               | 10.5           |
|                        | 6.4           | 0.045              | 4.1              | 0.029              | 440             | 3.09               | 10.6           |
| 6                      | 4.1           | 0.029              | 6.0              | 0.042              | 440             | 3.09               | 12.0           |
|                        | 8.5           | 0.060              | 2.1              | 0.015              | 482             | 3.39               | 10.8           |
| 8                      | 3.9           | 0.027              | 8.1              | 0.057              | 308             | 2.16               | 8.0            |
|                        | 7.3           | 0.051              | 2.4              | 0.017              | 330             | 2.32               | 7.4            |
| 9                      | 3.9           | 0.027              | 10.4             | 0.073              | 447             | 3.14               | 13.0           |
|                        | 7.9           | 0.055              | 3.8              | 0.027              | 461             | 3.24               | 10.8           |
| 11                     | 8.2           | 0.057              | 3.5              | 0.025              | 473             | 3.32               | 14.5           |
|                        | 8.0           | 0.056              | 2.4              | 0.017              | 464             | 3.26               | 10.8           |
| 12                     | 5.7           | 0.040              | 9.0              | 0.063              | 348             | 2.45               | 11.0           |
|                        | 7.0           | 0.049              | 3.1              | 0.022              | 376             | 2.64               | 8.7            |
| 14                     | 7.9           | 0.055              | 6.3              | 0.044              | 433             | 3.04               | 13.0           |
|                        | 6.9           | 0.048              | 3.9              | 0.027              | 394             | 2.77               | 10.0           |
| 15                     | 4.6           | 0.032              | 7.4              | 0.052              | 314             | 2.206              | 9.0            |
|                        | 7.3           | 0.051              | 3.3              | 0.023              | 312             | 2.19               | 7.6            |
| 17                     | 5.7           | 0.040              | 5.7              | 0.040              | 335             | 2.35               | 10.0           |
|                        | 5.4           | 0.038              | 3.4              | 0.024              | 387             | 2.72               | 8.0            |
| 18                     | 6.7           | 0.047              | 6.8              | 0.048              | 440             | 3.09               | 10.5           |
|                        | 7.0           | 0.049              | 4.1              | 0.029              | 421             | 2.96               | 11.0           |
| 21                     | 6.2           | 0.043              | 7.1              | 0.050              | 485             | 3.41               | 13.0           |
|                        | 8.3           | 0.058              | 2.9              | 0.020              | 433             | 3.04               | 12.5           |
| $M \pm m$              | $5.8 \pm 0.5$ | $0.041 \pm 0.003$  | $6.7 \pm 0.6$    | $0.047 \pm 0.004$  | $403 \pm 19$    | $2.83 \pm 0.14$    | $15.4 \pm 1.2$ |
|                        | $7.3 \pm 0.3$ | $0.051 \pm 0.002$  | $3.2 \pm 0.2$    | $0.023 \pm 0.002$  | $409 \pm 17$    | $2.88 \pm 0.12$    | $9.8 \pm 0.5$  |

Удельные активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в дерново-подзолистых почвах обследованных участков не превышали величины фона глобальных выпадений – 4–30 и 1–18 Бк/кг соответственно [11]. Усредненная удельная активность почв участков по величинам активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$  в 2021 г. была в 1.26 и 1.01 раза больше, чем в 2014 г., удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  со временем наблюдения уменьшилась в 2.09 раза.

Плотность загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в пахотном горизонте (0–20 см) почв была значительно меньше допустимых уровней относительно удовлетворительной экологической обстановки в 1 и 0.1 Ки/км<sup>2</sup> соответственно, что позволило отнести исследованные почвы участков к незагрязненным территориям [7].

Варьирования показателей МЭД  $\gamma$ -фона, удельных активностей и плотностей загрязнения почв участков  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  подчинялись закону нормального распределения признака. Сравнение показателей МЭД  $\gamma$ -фона, удельных активностей

и плотностей загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  зависимых выборок 2014 и 2021 г. выявило присутствие значимых различий между ними ( $p < 0.05$ ), что подтверждено расчетом величин  $t$ -критерия Стьюдента. Расчет  $t$ -критерия Стьюдента для удельной активности и плотности загрязнения  $^{40}\text{K}$  показал, что между ними отсутствовали существенные различия ( $p > 0.05$ ).

В среднем, за время проведения мониторинга МЭД  $\gamma$ -излучение дерново-подзолистых почв реперных участков не превышало средний показатель, характерный для почв сельскохозяйственных угодий России (11.4 мкР/ч) [12].

Проведенный корреляционный анализ показал наличие достоверных прямых корреляционных связей Пирсона высокой силы между МЭД  $\gamma$ -излучения почвы и удельной активностью  $^{40}\text{K}$  в 2014 г.:  $r_{(\text{МЭД}/^{40}\text{K})} = 0.87$  и в 2021 г.:  $r_{(\text{МЭД}/^{40}\text{K})} = 0.75$  при  $p < 0.05$ . Следует отметить, что из ряда РН, являющихся  $\gamma$ -излучателями,  $^{40}\text{K}$  отличается наи-

**Таблица 3.** Коэффициенты линейной корреляции Пирсона между свойствами почв и удельными активностями РН

| Свойства<br>почвы/РН | Фракция, %            |                       | C <sub>орг</sub> , %  | рН <sub>KCl</sub>     | Ca                    | Mg                    | S                    | <sup>137</sup> Cs      | <sup>90</sup> Sr       | <sup>40</sup> K       |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
|                      | <0.001 мм             | <0.01 мм              |                       |                       | смоль(экв)/100 г      |                       |                      |                        |                        |                       |
|                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                      |                        |                        |                       |
| <sup>137</sup> Cs    | <u>0.79*</u><br>-0.12 | <u>0.80*</u><br>-0.15 | <u>0.21</u><br>-0.04  | <u>-0.31</u><br>-0.04 | <u>-0.80*</u><br>0.07 | <u>-0.68*</u><br>0.54 | <u>-0.10</u><br>0.16 | -                      | <u>-0.70*</u><br>-0.55 | <u>0.45</u><br>0.42   |
| <sup>90</sup> Sr     | <u>-0.25</u><br>0.24  | <u>-0.29</u><br>0.20  | <u>-0.02</u><br>-0.20 | <u>0.43</u><br>-0.20  | <u>0.70*</u><br>0.22  | <u>0.62*</u><br>0.13  | <u>0.41</u><br>0.22  | <u>-0.70*</u><br>-0.55 | -                      | <u>-0.25</u><br>-0.05 |
| <sup>40</sup> K      | <u>0.35</u><br>0.13   | <u>0.36</u><br>0.11   | <u>0.54</u><br>0.14   | <u>-0.05</u><br>0.14  | <u>-0.48</u><br>0.40  | <u>-0.35</u><br>0.67* | <u>0.46</u><br>0.33  | <u>0.45</u><br>0.42    | <u>-0.25</u><br>-0.05  | -                     |

\*Значимые коэффициенты корреляции при  $p < 0.05$ . То же в табл. 4.

большими концентрациями присутствия во многих почвах мира.

Отсутствие значимых корреляционных связей между МЭД  $\gamma$ -излучения почвы и удельной активностью <sup>137</sup>Cs в 2014 и 2021 г. ( $r_{(МЭД/^{137}Cs)} = 0.47$  и  $0.53$  соответственно, при  $p < 0.05$ ) можно объяснить низкими величинами активности и, следовательно, малым вкладом <sup>137</sup>Cs в формирование суммарного фона  $\gamma$ -излучения исследованных почв реперных участков.

Отмеченные корреляционные взаимосвязи между физико-химическими свойствами дерново-подзолистой почвы и удельными активностями <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr и <sup>40</sup>K, а также между самими изученными РН отражены в табл. 3.

Судя по величинам коэффициентов корреляции ( $r = 0.79-0.80$ ,  $p < 0.05$ ), достоверно установлено, что содержание частиц фракций физической глины и ила приводило к увеличению удельной активности <sup>137</sup>Cs в почве только в 2014 г. Вероятно, это могло быть связано с созданием в 2014 г. более благоприятных внешних условий среды для адсорбции <sup>137</sup>Cs минеральными и органическими частицами дерново-подзолистых почв, чем в 2021 г. В остальных случаях наличие мелкодисперсных частиц не коррелировало с накоплением почвами изученных РН.

Содержание C<sub>орг</sub> и уровень pH<sub>KCl</sub> не оказывали достоверного влияния на аккумуляцию <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr и <sup>40</sup>K исследованной почвой.

Обменные основания Ca и Mg существенно влияли на удельную активность <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в 2014 г. Поглощенные основания (S) не оказывали заметного влияния на активность изученных РН.

Среднюю и высокую корреляционную взаимосвязь обратной зависимости ( $r = -0.55$  и  $r = -0.70$ ) между присутствием <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в почве предпо-

жительно можно объяснить различными механизмами поглощения данных ИРН почвой (табл. 3). Следует отметить, что между сорбцией почвами <sup>137</sup>Cs и <sup>40</sup>K отмечена прямая корреляция средней силы. Возможно, это обстоятельство связано с тем, что <sup>137</sup>Cs и <sup>40</sup>K — химические аналоги, а значит, и многие особенности их поглощения почвами могут быть идентичными.

Данные удельной активности <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr в растениях и K<sub>п</sub> <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr из почвы в растения даны в табл. 4. Поступление РН из почв в растения зависит от типа почвы и ее свойств. В сельскохозяйственной радиобиологии установилось понимание того, что из кислых почв, обедненных основаниями Ca и Mg, легкого гранулометрического состава <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr более интенсивно поступают в растения по сравнению с высокоплодородными и богатыми основаниями почвами [13].

Кроме того, немаловажное влияние на накопление ИРН растениями оказывают и биологические особенности культур, обусловленные видовой и сортовой принадлежностью. Например, различия в накоплении <sup>90</sup>Sr у зерновых и бобовых культур, выращенных на одной почве, различаются в 85 раз, у корнеплодов и овощных культур — в 350 раз [14], у кукурузы — в 10–15 раз [15], <sup>137</sup>Cs у картофеля — в 14 раз, у моркови — в 2.5 раза [16].

Исследованием были определены последовательности культур в рядах накопления и перехода <sup>137</sup>Cs и <sup>90</sup>Sr из дерново-подзолистой почвы реперных участков в 2014 и 2021 г. Установлено, что средняя величина удельной активности <sup>137</sup>Cs в зеленой массе культур снижалась в ряду: полевица собачья, мятлик луговой, щучка дернистая > клевер розовый, тимopheевка луговая; удельная активность <sup>90</sup>Sr снижалась в ряду: клевер розовый, тимopheевка луговая > полевица собачья, мятлик луговой, щучка дернистая.

Таблица 4. Параметры перехода и удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в растениях

| Реперный участок, №                | Культура (вид продукции)                | Удельная активность, Бк/кг          |                                     | $K_{II}$                            |                                     |
|------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
|                                    |                                         | $^{137}\text{Cs}$                   | $^{90}\text{Sr}$                    | $^{137}\text{Cs}$                   | $^{90}\text{Sr}$                    |
| 1                                  | Овес (зерно/солома)                     | 1.50/3.00                           | 1.10/1.31                           | 0.78/1.56                           | 1.21/1.44                           |
|                                    | Овес (зерно/солома)                     | 1.50/4.00                           | 0.50/2.20                           | 0.90/2.40                           | 0.47/2.06                           |
| 6                                  | Озимая пшеница (зерно/солома)           | 1.70/3.10                           | 0.30/3.30                           | 1.58/2.89                           | 0.19/2.10                           |
|                                    | Овес (зерно/солома)                     | 2.00/2.10                           | 1.10/1.50                           | 0.90/0.95                           | 2.01/2.73                           |
| 8                                  | Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса) | 3.30                                | 4.35                                | 3.30                                | 2.10                                |
|                                    | Клевер, тимофеевка (зеленая масса)      | 3.30                                | 1.30                                | 1.75                                | 2.10                                |
| 9                                  | Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса) | 3.20                                | 0.70                                | 3.20                                | 0.26                                |
|                                    | Клевер, тимофеевка (зеленая масса)      | 1.90                                | 0.20                                | 0.93                                | 0.20                                |
| 11                                 | Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса) | 2.90                                | 8.26                                | 1.38                                | 9.18                                |
|                                    | Клевер, тимофеевка (зеленая масса)      | 3.50                                | 2.20                                | 1.69                                | 3.54                                |
| 12                                 | Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса) | 2.80                                | 1.04                                | 1.89                                | 0.45                                |
|                                    | Клевер, тимофеевка (зеленая масса)      | 2.10                                | 0.40                                | 1.16                                | 0.50                                |
| 14                                 | Ячмень (зерно/солома)                   | 1.80/2.70                           | 0.80/2.70                           | 0.88/1.33                           | 0.49/1.66                           |
|                                    | Яровая пшеница (зерно/солома)           | 1.10/3.30                           | 1.00/1.90                           | 0.62/1.86                           | 1.00/1.89                           |
| 15                                 | Ячмень (зерно/солома)                   | 1.70/2.90                           | 0.70/1.90                           | 1.44/2.45                           | 0.37/1.00                           |
|                                    | Клевер, тимофеевка (зеленая масса)      | 2.10                                | 0.40                                | 1.11                                | 0.47                                |
| 17                                 | Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса) | 3.10                                | 1.36                                | 2.09                                | 0.92                                |
|                                    | Клевер, тимофеевка (зеленая масса)      | 3.40                                | 1.30                                | 2.42                                | 1.47                                |
| 18                                 | Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса) | 2.90                                | 1.06                                | 1.67                                | 0.60                                |
|                                    | Клевер, тимофеевка (зеленая масса)      | 3.20                                | 1.70                                | 1.77                                | 1.60                                |
| 21                                 | Клевер, тимофеевка (зеленая масса)      | 3.70                                | 1.06                                | 2.33                                | 0.93                                |
|                                    | Овес (зерно/солома)                     | 2.20/2.70                           | 1.50/1.90                           | 1.03/1.26                           | 2.00/2.53                           |
| $M \pm m$                          | Овес (зерно/солома)                     | 1.80 $\pm$ 0.18/<br>2.95 $\pm$ 0.40 | 1.05 $\pm$ 0.21/<br>1.73 $\pm$ 0.20 | 0.90 $\pm$ 0.05/<br>1.54 $\pm$ 0.31 | 1.42 $\pm$ 0.37/<br>2.19 $\pm$ 0.29 |
|                                    | Яровая пшеница (зерно/солома)           | 1.10 $\pm$ 0.16/<br>3.30 $\pm$ 0.43 | 1.00 $\pm$ 0.18/<br>1.90 $\pm$ 0.20 | 0.16 $\pm$ 0.01/<br>0.48 $\pm$ 0.16 | 0.26 $\pm$ 0.05/<br>0.49 $\pm$ 0.06 |
|                                    | Ячмень (зерно/солома)                   | 1.75 $\pm$ 0.05/<br>2.80 $\pm$ 0.10 | 0.75 $\pm$ 0.05/<br>2.30 $\pm$ 0.40 | 1.16 $\pm$ 0.28/<br>1.89 $\pm$ 0.56 | 0.43 $\pm$ 0.06/<br>1.33 $\pm$ 0.33 |
|                                    | Озимая пшеница (зерно/солома)           | 1.70 $\pm$ 0.12/<br>3.10 $\pm$ 0.45 | 0.30 $\pm$ 0.06/<br>3.30 $\pm$ 0.44 | 1.58 $\pm$ 0.23/<br>2.89 $\pm$ 0.49 | 0.19 $\pm$ 0.04/<br>2.10 $\pm$ 0.39 |
|                                    | Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса) | 3.03 $\pm$ 0.08                     | 2.13 $\pm$ 0.56                     | 2.26 $\pm$ 0.33                     | 1.39 $\pm$ 0.51                     |
|                                    | Клевер, тимофеевка (зеленая масса)      | 2.90 $\pm$ 0.26                     | 1.15 $\pm$ 0.26                     | 1.64 $\pm$ 0.19                     | 1.35 $\pm$ 0.39                     |
|                                    | Овес (зерно/солома)                     | 0.86/–0.97*                         | –0.63/0.49                          |                                     |                                     |
|                                    | Яровая пшеница (зерно/солома)           | 0.34/0.29                           | 0.41/0.45                           |                                     |                                     |
| $r$ ИРН почва/<br>$r$ ИРН растение | Ячмень (зерно/солома)                   | 0.79*/–0.43                         | 0.57/0.65                           |                                     |                                     |
|                                    | Озимая пшеница (зерно/солома)           | 0.51/0.29                           | 0.09/0.35                           |                                     |                                     |
|                                    | Полевица, мятлик, щучка (зеленая масса) | –0.77                               | –0.23                               |                                     |                                     |
|                                    | Клевер, тимофеевка (зеленая масса)      | –0.42                               | 0.15                                |                                     |                                     |

Интенсивность перехода  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в растения снижалась в ряду: полевица собачья, мятлик луговой, щучка дернистая > клевер розовый, тимopheевка луговая; для  $^{90}\text{Sr}$ : полевица собачья, мятлик луговой, щучка дернистая > клевер розовый, тимopheевка луговая.

Ряды последовательности культур по величине удельной активности и  $K_{\text{П}}$  для  $^{137}\text{Cs}$  сопоставимы между собой, в отношении  $^{90}\text{Sr}$  отмечено не сопоставление позиций в рядах.

Среди зерновых культур удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в зерне снижалась в ряду: овес > ячмень > озимая пшеница > яровая пшеница; в соломе: яровая пшеница > озимая пшеница > овес > ячмень. Удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  в зерне злаков снижалась в ряду: овес > яровая пшеница > ячмень > озимая пшеница; в соломе: озимая пшеница > ячмень > яровая пшеница > овес.

Фактические величины удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  (на абсолютно сухое вещество) всех видов культур полностью удовлетворяли ветеринарным требованиям к ограничению содержания  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в кормовых травах (зеленой массе) на уровне  $\leq 370$  и 50 Бк/кг, грубых кормах (соломе) —  $\leq 600$  и 100 Бк/кг и фуражном зерне злаковых — 600 и 65 Бк/кг в сырой массе соответственно [17].

Накопление  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  одними и теми же культурами менялось по годам. В 2014 г. растения в основном интенсивнее поглощали  $^{137}\text{Cs}$ , чем  $^{90}\text{Sr}$ , в 2021 г. — наоборот, о чем свидетельствовали рассчитанные величины  $K_{\text{Н}}$  (рис. 2).

Установленные для культур величины  $K_{\text{Н}}$   $^{137}\text{Cs}$  и  $K_{\text{Н}}$   $^{90}\text{Sr}$  для надземной фитомассы травостоев на обследованных участках укладывались в пределы от 0.16 до 0.85 и от 0.05 до 0.93 соответственно, что хорошо подтверждали величины  $K_{\text{Н}}$   $^{137}\text{Cs} = 0.12$ –2.08 и  $K_{\text{Н}}$   $^{90}\text{Sr} = 0.20$ –0.86, приведенные в работе [18].

Многочисленными исследованиями установлено, что ИРН в генеративных органах растений (зерно, плоды и др.) накапливаются в меньших количествах, чем в вегетативных органах (соломе, листьях) [19, 20]. В нашем исследовании зерно озимой и яровой пшеницы, овса и ячменя во всех случаях меньше накапливало  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  по сравнению с соломой этих культур. Эффективность защитного действия от проникновения  $^{137}\text{Cs}$  в зерно из вегетативных органов снижалась в ряду: яровая пшеница > озимая пшеница > овес > ячмень; для  $^{90}\text{Sr}$  ряд был следующим: озимая пшеница > ячмень > овес > яровая пшеница.

Расчет коэффициентов корреляции Пирсона, показал, что между удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в зерне и соломе овса отмечены недостоверные взаимосвязи:  $r_{^{137}\text{Cs зерно/солома}} = -0.71$  и  $r_{^{90}\text{Sr зерно/солома}} = -0.43$ ; в зерне и соломе озимой пшеницы выявлена недостоверная взаимосвязь для:  $r_{^{137}\text{Cs зерно/солома}} = -0.76$  и достоверная для:  $r_{^{90}\text{Sr зерно/солома}} = -0.89$ ; в зерне и соломе яровой пшеницы достоверная взаимосвязь для:  $r_{^{137}\text{Cs зерно/солома}} = -0.80$  и недостоверная для:  $r_{^{90}\text{Sr зерно/солома}} = -0.58$ ; в зерне и соломе ячменя выявлены недостоверные взаимосвязи для:  $r_{^{137}\text{Cs зерно/солома}} = -0.69$  и  $r_{^{90}\text{Sr зерно/солома}} = -0.70$ .

Расчет коэффициентов перехода  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  (табл. 4) из почвы в культуры показал, что процесс перехода  $^{90}\text{Sr}$  из почвы в растения овса и яровой пшеницы проходил интенсивнее, чем переход  $^{137}\text{Cs}$ , для остальных культур — наоборот.

Сила корреляционной взаимосвязи между величинами удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в почвах и растениях изменялась в зависимости от видовой принадлежности культур. Между рассмотренными показателями в основном отмечали прямую связь средней силы.

## ВЫВОДЫ

1. Средние величины удельных активностей  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в дерново-подзолистых почвах реперных участков Ивановской обл. не превышали фоновых показателей глобальных выпадений. Удельная активность почв для  $^{40}\text{K}$  была в 1.12–1.14 раза больше типичного показателя, характерного для исследованной почвы.

2. Усредненная удельная активность почв участков для  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{40}\text{K}$  в 2021 г. была больше, чем в 2014 г., удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  во время наблюдения уменьшилась.

3. Присутствие  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в дерново-подзолистой почве обусловлено глобальными выпадениями ИРН на территории области, содержание  $^{40}\text{K}$  определяется генезисом и физико-химическими свойствами почв.

4. Плотность загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в пахотном горизонте почв участков была значительно меньше допустимых уровней относительно удовлетворительной экологической обстановки — 1 и 0.1 Ки/км<sup>2</sup> соответственно, что позволило отнести почвы всех участков к незагрязненным территориям.

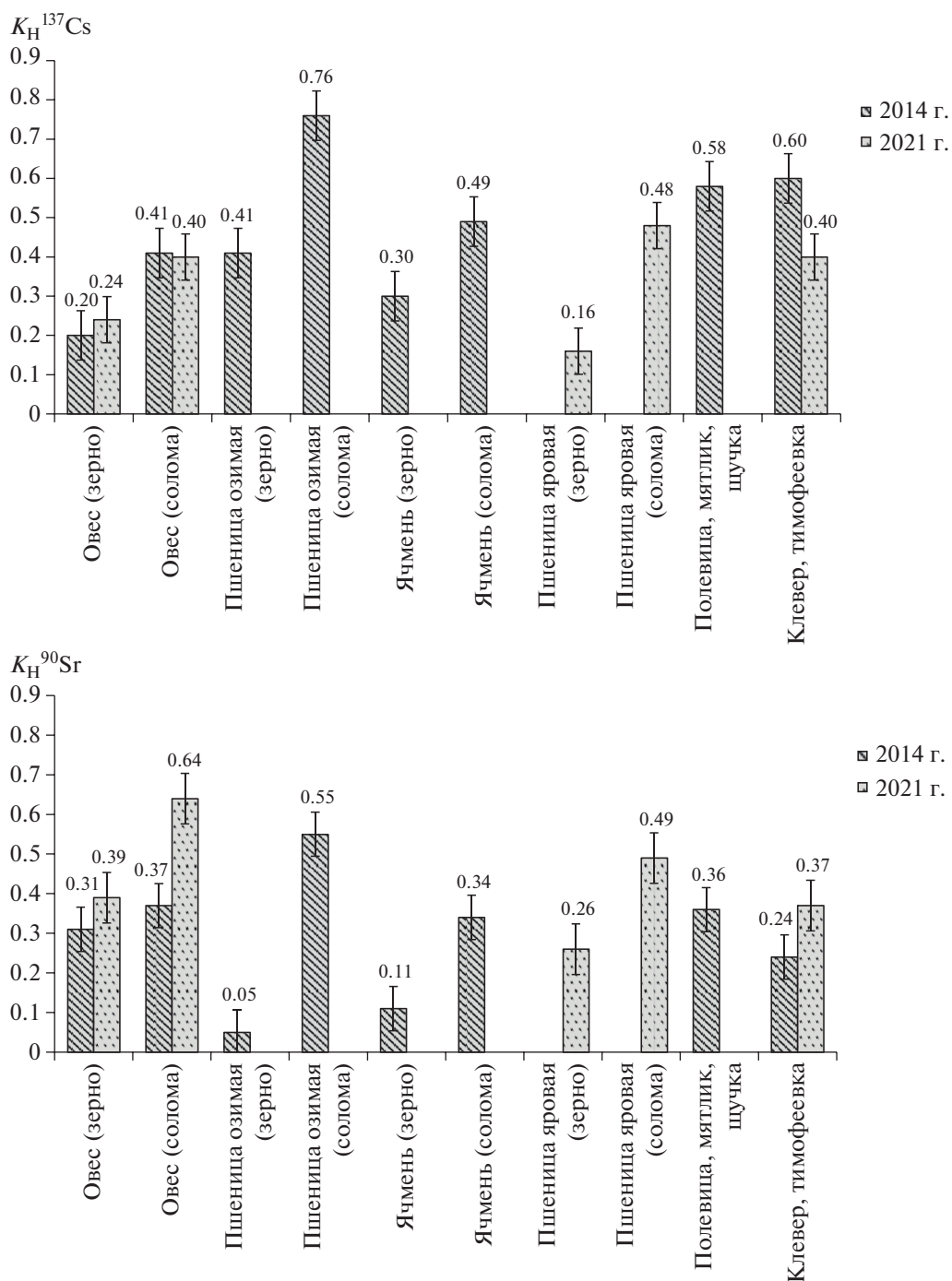


Рис. 2. Коэффициенты накопления растениями: (а) –  $^{137}\text{Cs}$ , (б) –  $^{90}\text{Sr}$ .

5. Сформированное  $\gamma$ -излучение почв участков не превышало средний показатель, характерный для почв сельскохозяйственных угодий России. Наибольший достоверный вклад в формирование  $\gamma$ -излучения почв отмечен со стороны  $^{40}\text{K}$ , наименьший и несущественный – от  $^{137}\text{Cs}$ .

6. Между удельной активностью  $^{137}\text{Cs}$  с частями фракций физической глины и ила в 2014 г.

отмечена существенная корреляционная взаимосвязь. В остальных случаях достоверно отмеченной корреляции между другими физико-химическими свойствами почвы и удельными активностями изученных радионуклидов не обнаружено.

7. Усредненная величина удельной активности в зеленой массе культур  $^{137}\text{Cs}$  снижалась в ряду: полевица собачья, мятлик луговой, щучка дерни-

стая > клевер розовый, тимopheевка луговая; активность  $^{90}\text{Sr}$  снижалась в ряду: клевер розовый, тимopheевка луговая > полевица собачья, мятлик луговой, щучка дернистая. У зерновых культур удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в зерне снижалась в ряду: овес > ячмень > озимая пшеница > яровая пшеница; в соломе: яровая пшеница > озимая пшеница > овес > ячмень. Удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  в зерне снижалась в ряду: овес > яровая пшеница > ячмень > озимая пшеница; в соломе: озимая пшеница > ячмень > яровая пшеница > овес.

8. Величины удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  во всех видах культур и выращенной продукции полностью удовлетворяли ветеринарным нормам к ограничению содержания  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в растительной продукции, предназначенной на корм животным.

9. Судя по полученным величинам коэффициентов накопления, поглощение  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  всеми растениями укладывалось в нормативные пределы, характерные для надземной фитомассы.

10. Зерно всех злаков меньше накапливало как  $^{137}\text{Cs}$ , так и  $^{90}\text{Sr}$ , по сравнению с соломой этих культур.

11. Между величинами удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в почвах и растениях отмечена в основном корреляция прямой зависимости средней силы взаимосвязи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физические величины: Справ-к / Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
2. Saleh M.S., Ramli A.T., Alajerami Y. Assessment of environmental  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  concentrations in the region of elevated radiation background in Segamat District, Johr, Malaysia // J. Environ. Radioact. 2013. V. 124. P. 130–140.
3. Гордеев А.В., Клещенко А.Д., Черняков Б.А., Сиротенко О.Д. Биоклиматический потенциал России: теория и практика. М.: Товарищ-во научн. изданий КМК, 2006. 509 с.
4. Уткин А.А. Оценка радиационной обстановки на реперных участках сельскохозяйственных угодий Владимирской области // Радиационная биология. Радиоэкология. 2022. Т. 62. № 6. С. 660–672. <https://doi.org/10.31857/S0869803122060133>
5. Уткин А.А. Мониторинг  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{40}\text{K}$  в серых лесных почвах и растениях реперных участков Владимирской области // Радиационная биология. Радиоэкология. 2023. Т. 63. № 2. С. 194–205. <https://doi.org/10.31857/S0869803123020121>
6. Гаврилова И.П., Касимов Н.С. Практикум по геохимии ландшафта. М.: Изд-во МГУ, 1989. 73 с.
7. Критерии оценки экологической обстановки территории для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия / Под ред. Н.Г. Рыбальского. М.: Минприроды России, 1992.
8. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: Росинформагротех, 2003. 240 с.
9. Апарин Б.Ф., Мингареева Е.В., Санжарова Н.И. Содержание радионуклидов ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) в черноземах Волгоградской области разных сроков отбора образцов // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1457–1467. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17120036>
10. Почвоведение. Уч-к для ун-тов. В 2 ч. / Под ред. В.А. Ковды, Б.Г. Розанова. Ч. 1. Почва и почвообразование. М.: Высш. шк., 1988. 400 с.
11. Радиационная обстановка на территории СССР в 1990 г. / Под ред. Махонько К.П. Госкомгидромет СССР. Обнинск: НПО “Тайфун”, 1991.
12. Орлов П.М., Сычев В.Г., Жиленко С.В. Радиоактивность почв юга России // Нива Поволжья. 2017. № 1(42). С. 53–60.
13. Сельскохозяйственная радиоэкология / Под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. М.: Экология, 1992. 400 с.
14. Архипов Н.П., Федоров Е.А., Алексахин Р.М. Почвенная химия и корневое накопление искусственных радионуклидов в урожае сельскохозяйственных растений // Почвоведение. 1975. № 11. С. 40–52.
15. Schneider R., Kuznetsov V.K., Sanzharova N.I. Soil-to-plant and soil-to-grain transfer of  $^{137}\text{Cs}$  in fieldgrown maize hybrids during two contrasting seasons: assessing the phenotypic variability and its genetic component // Radiat. Environ. Biophys. 2008. V. 47. P. 241–252.
16. Кожуханов Т.Е., Лукашенко С.Н. Содержание радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  в продукции растениеводства на территориях, прилегающих к Семипалатинскому испытательному полигону // Радиационная биология. Радиоэкология. 2017. Т. 57. № 2. С. 220–225.
17. Ветеринарно-санитарные требования к радиационной безопасности кормов, кормовых добавок, сырья кормового. Допустимые уровни содержания  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Ветеринарные правила и нормы ВП 13.5.13/06-01 (утв. Минсельхозом РФ 19.12.2000).
18. Ефремов И.В., Рахимова Н.Н., Янчук Е.Л. Особенности миграции радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в системе почва–растение // Вестн. ОГУ. 2005. № 12. С. 42–46.
19. Санжарова Н.И., Гешель И.В., Крыленкин Д.В. Современное состояние исследований поведения  $^{90}\text{Sr}$  в системе почва–сельскохозяйственные растения (обзор) // Радиационная биология. Радиоэкология. 2019. Т. 59. № 6. С. 643–665.
20. Андреева Н.В., Белова Н.В., Кузнецов В.К. Влияние различных видов органических удобрений на переход  $^{137}\text{Cs}$  в урожай зерновых культур // Радиационная биология. Радиоэкология. 2020. Т. 60. № 1. С. 117–125.

## Monitoring of $^{37}\text{C}$ , $^{90}\text{Sr}$ and $^{40}\text{K}$ in Sod-Podzolic Soils and Plants of Reference Sites of the Ivanovo Region

A. A. Utkin<sup>a, #</sup>, N. I. Akanova<sup>b</sup>, and I. B. Noda<sup>c</sup>

<sup>a</sup> D.K. Belyaev Ivanovo State Agricultural Academy  
ul. Sovetskaya 45, Ivanovo 153012, Russia

<sup>b</sup> D.N. Pryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry  
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127550, Russia

<sup>c</sup> Agrochemical Service Station "Ivanovskaya"  
ul. Centralnaya, 8, Ivanovo region, Bogorodskoe 153506, Russia

<sup>#</sup> E-mail: aleut@inbox.ru

The results of radiation monitoring of sod-podzolic soils of reference agricultural plots of the Ivanovo region, conducted in 2014 and 2021, are presented. Background values of the specific activities of the studied radionuclides in the soils of reference sites have been established. According to the pollution density of the arable horizon of soils  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$ , the level of the ecological situation was determined, which made it possible to attribute the soils of all reference areas of the region to uncontaminated territories suitable without restrictions for agricultural use. The power of the exposure dose of gamma radiation of soils and the contribution of  $^{40}\text{K}$  and  $^{137}\text{Cs}$  to the formation of the gamma background of soils were determined. Correlation analysis determined the influence of individual physical and chemical properties of soils on the behavior and distribution of radionuclides in the soil and the relationship between the content of the radionuclides themselves. Based on the values of the specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in plant products grown in 2014 and 2021, rows of cultivated plants with a decreasing ability to accumulate these radionuclides from the soil were constructed. All grown plant products of all types of crops fully met the veterinary standards required to limit the content of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in plant feeds (green mass, straw and feed grain). The coefficients of accumulation and transition of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  from soil to plants are calculated. The coefficients of linear correlation between the values of the specific activity of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in soils and plants revealed the strength and nature of these dependencies.

**Keywords:** radiation monitoring,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{40}\text{K}$ , sod-podzolic soil, plants, reference sites, Ivanovo region.

УДК 63.54:574.4

## АГРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ CO<sub>2</sub> В АГРОЭКОСИСТЕМАХ. СООБЩЕНИЕ 2. ВОССТАНОВЛЕНИЕ МИКРОБНОГО ЗВЕНА АГРОГЕОХИМИЧЕСКОГО КРУГОВОРОТА

© 2023 г. В. Н. Башкин<sup>1,\*</sup>, Р. А. Галиulina<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН  
142290 Пущино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

<sup>2</sup> Институт фундаментальных проблем биологии РАН  
142290 Пущино, Московская обл., ул. Институтская, 2, Россия

\*E-mail: vladimirbashkin@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.02.2023 г.

После доработки 06.03.2023 г.

Принята к публикации 15.04.2023 г.

Рассмотрено применение агрогеохимических технологий, направленных на восстановление агрогеохимических циклов в сельскохозяйственных экосистемах, прежде всего в микробном звене, регулирующем потоки CO<sub>2</sub>. Приведены примеры рекультивации нарушенных и загрязненных почв, переувлажненных и/или переосушенных почв и оценено их воздействие на величину потока CO<sub>2</sub>. Представлен комплекс агрогеохимических технологий, направленных на оценку и стабилизацию микробного звена биогеохимического цикла в агроэкосистемах. Приведены примеры использования этих технологий для регулирования выбросов CO<sub>2</sub> в агроэкосистемах. С использованием одной из таких технологий показано почти 5-кратное снижение скорости потоков CO<sub>2</sub> при рекультивации нарушенных пастбищных экосистем тундры. Необходимы дальнейшее развитие и использование агрогеохимических технологий, направленных на восстановление биогеохимических циклов в агроэкосистемах, прежде всего в микробном звене, регулирующем потоки CO<sub>2</sub>.

**Ключевые слова:** агроэкосистемы, потоки CO<sub>2</sub>, микробоценозы, регулирующие факторы, удобрения, агрогеохимические технологии.

**DOI:** 10.31857/S0002188123070049, **EDN:** OFPDTZ

### ВВЕДЕНИЕ

Агрогеохимические технологии являются природоподобными технологиями и направлены на восстановление агрогеохимической цикличности в сельскохозяйственных экосистемах или, другими словами, биогеохимических циклов в агроэкосистемах. Это необходимо, прежде всего, в микробном звене агрогеохимического круговорота [1]. Целью данного сообщения являются рассмотрение трансформации именно микробного звена агрогеохимических круговоротов в нарушенных и загрязненных агроэкосистемах и приемы его восстановления с использованием различных агрогеохимических технологий.

### РЕКУЛЬТИВАЦИЯ НАРУШЕННЫХ И ЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ

*Рекультивация нарушенных тундровых почв.*  
Ямало-Ненецкий автономный округ (Россия) от-

личают не только огромные запасы природного газа в стране, но и самое большое поголовье домашних оленей. В процессе добычи и транспортировки углеводородного сырья не исключены механические воздействия на почвенный и растительный покров при проезде техники, необходимой для проведения геологоразведочных работ, бурения скважин и обустройства месторождения. Кроме того, куда больший масштаб деградация пастбищ приобретает при чрезмерном стравливании северными оленями, в результате чего нарушается целостность тундровых почв, т.к. они частично или полностью лишаются растительного покрова и органогенного слоя. Затем наступает период их разрушения под действием ветра, что приводит к образованию песчаных обнажений. Потери, понесенные в результате этих процессов, значительно превышают потери пастбищ при промышленном освоении территорий. При этом естественное восстановле-

ние выбитых оленьих пастбищ может занять несколько десятилетий. Соответственно, крайне актуальной становится своевременная рекультивация тундровых почв, нарушенных добычей и транспортировкой углеводородного сырья, а также нерациональным выпасом оленьих стад для предотвращения их окончательного “опустынивания”.

Данную проблему можно эффективно решить с помощью инновационной биогеохимической технологии рекультивации, обеспечивающей природоподобный подход к восстановлению плодородия нарушенных и загрязненных тундровых почв. Согласно концептуальной модели этой технологии, в нарушенных почвах в первую очередь необходимо учитывать их гранулометрический состав или общую влагоемкость. Затем необходимо внести местный торф, учитывая при этом его состав, чтобы он оптимально подходил для данного конкретного участка [2–4]. После этого производят посев семян и выращивают на участке смесь многолетних трав с использованием гумата калия, полученного из отборного местного торфа и выступающего в качестве стимулятора роста и развития данных видов растений. Этот классический природный процесс гарантированно завершается с желаемым результатом благодаря развитым технологиям, учитывающим региональные природно-климатические особенности конкретной рекультивируемой территории и уделяющим внимание ее естественным параметрам. Применяемая биогеохимическая технология представляет собой строго определенную последовательность операций, выполняемых в 3 этапа [4]. На первом этапе а) на крупномасштабной карте, предназначенной для рекультивации территории в масштабе 1:200000 и крупнее выделяют отдельные участки с нарушенными почвами и указывают размер их площадей, а также определяют местонахождение торфяников, где можно отбирать торф, потенциально пригодный для рекультивации; б) с этих участков и месторождений отбирают усредненные репрезентативные пробы почвы и торфа (из слоя 0–6 см) соответственно для определения гранулометрического состава и/или общей влагоемкости почвы, а также с целью последующего выбора месторождения — из него необходимо взять торф, который оптимально подходит для рекультивации данного конкретного участка; в) гранулометрический состав почвы определяют при рекультивации нарушенных почв на участках с волнистым рельефом и неоднородным почвенным покровом; г) общую влагоемкость почвы определяют при рекультивации нарушенных почв на участках с равнинным

или слаборасчлененным рельефом и монотонным однородным почвенным покровом. Самое главное на этом этапе, чтобы большая часть результатов была получена в лаборатории, например, зимой, в течение не более 30 сут. Второй этап включает следующие действия: а) исходя из выбранного соотношения торфа и грунта и с учетом площади участка для рекультивации, рассчитывают массу торфа, вносимого в слой 0–6 см нарушенной почвы, и массу самой нарушенной почвы в слое 0–6 см; б) подготовленную торфяную массу предварительно доводят до рассыпчатого состояния воздушной сушкой, что необходимо для удобного равномерного распределения такой массы по всей площади рекультивируемого участка и дальнейшей ее закладки в слой нарушенного грунта; в) производят закладку торфа в слой 0–6 см нарушенного грунта участка в соответствии с расчетной дозой; г) последующий посев смеси многолетних трав методом “залужения”, т.е. создание на участке сплошного травяного покрова с помощью соответствующих технологий и оборудования. В составе травосмесей, формируемых из многолетних трав, может входить кострец (*Bromus inermis*), кабан сибирский (*Elymus sibiricus*), овсяница луговая (*Festuca pratensis*), овсяница красная (*Festuca rubra*), мятлик луговой (*Poa pratensis*), тимopheевка луговая (*Phleum pratense*) и другие виды, позволяющие получить на рекультивируемом участке плотную траву и плотный травяной дерн.

Третий этап включает: а) для улучшения посевных свойств семян, регулирования состояния растений на разных этапах их роста и развития в процессе формирования их продуктивности, а также для повышения устойчивости растений к неблагоприятным воздействиям внешней среды применяют гумат калия, который вносят в определенных дозах для замачивания семян перед посевом, в качестве корневых и внекорневых подкормок (опрыскивания) в период вегетации с помощью соответствующей технологии и приемов [3]; б) гумат калия выделяют оригинальным способом из местного специально отобранного торфа Ямало-Ненецкого автономного округа, который оптимально подходит рекультивируемому участку. Из этого торфа извлекают гуминовые кислоты. Их очистку проводят по всем правилам получения химически чистых веществ, практически не влияющих на молекулярные структуры гуминовых кислот. Это гарантирует получение стабильного гумата калия; в) дальнейший уход за растительностью на рекультивируемом участке осуществляется с помощью соответствующих технологий и оборудования; г) эффективность

**Таблица 1.** Потоки углекислого газа из нарушенной и рекультивированной тундровой почвы оленьих пастбищ

| Почва              | Максимальная скорость выделения, мкмоль $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$ | Общее суточное выделение, г $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$ | Изменение баланса $\text{CO}_2$ , мкмоль $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$ | Суммарное дыхание экосистемы, мкмоль $\text{CO}_2/\text{м}^2/\text{сут}$ |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Нарушенная         | 0.21                                                                      | 1.02                                                            | 0.12                                                                         | 0.62                                                                     |
| Рекультивированная | 0.04                                                                      | 0.21                                                            | 0.19                                                                         | 0.19                                                                     |

рекультивации нарушенных почв с применением торфа и гумата калия оценивают в целом по результатам сравнительного анализа 2-х основных показателей восстановления плодородия — активности фермента дегидрогеназы и биомассы смеси многолетних трав, полученных на нарушенных и рекультивированных почвах.

Высокая эффективность инновационной биогеохимической технологии рекультивации нарушенных тундровых почв подтверждена результатами оценки восстановления плодородия почв Тазовского полуострова аномально жарким и засушливым летом 2016 г. в Ямало-Ненецком автономном округе. Например, уже за 2 нед наблюдения активность фермента дегидрогеназы рекультивированной почвы увеличилась в 50 раз, а биомасса смеси многолетних трав на рекультивированной почве увеличилась на 50% по сравнению с показателями нарушенной почвы, что свидетельствовало о большом потенциале восстановления плодородия почвы данным методом.

Восстановление нарушенных тундровых пастбищ также резко снижает выбросы углекислого газа (табл. 1). Такие изменения отражают восстановление температурного режима при мелиорации пастбищ, что способствует сокращению минерализации органического вещества (торфяного материала) и уменьшению выделения  $\text{CO}_2$ .

Следует подчеркнуть, что данные тундровые почвы используют под пастбища в зоне вечной мерзлоты, и они являются одними из основных компонентов глобального круговорота углерода. В случае прогнозируемого изменения климата они могут стать значительным источником выбросов парниковых газов. Для оценки температурной чувствительности истечения  $\text{CO}_2$  из торфяных почв на севере Западной Сибири был поставлен 4-летний трансплантационный эксперимент (перенос почвенных кернов высотой 20 см и диаметром 10 см) в торфяном горизонте почв. Повышение температуры в среднем на  $7^\circ\text{C}$  вызывало положительную обратную связь (30–70%) выделения  $\text{CO}_2$  из пересаженных почв по сравнению с контрольными показателями. Температурная зависимость эмиссии  $\text{CO}_2$  из трансплантированных

почв имела наибольшую величину ( $R^2 = 0.8$ ) в первые 2 года в результате максимальной контрастности температурных условий между участками и снижалась в последние 2 года. И наоборот, большую часть времени ( $Q_{10} = 3\text{--}6$ ) температурная чувствительность выделения  $\text{CO}_2$  из трансплантированных почв демонстрировала высокие показатели, что свидетельствовало об увеличении скорости разложения органического вещества в торфяных почвах зоны вечной мерзлоты в течение длительного периода времени (4 года) [5].

*Рекультивация загрязненных почв.* Как было показано, суммарные выделения  $\text{CO}_2$  из почв в агроэкосистемах определяются влиянием комплекса факторов внешней среды на совокупность биологических и физико-химических процессов в почвах. Выявить влияние загрязнения почв на их фоне достаточно сложно. Оперативный мониторинг показал, что аэротехногенное загрязнение почв химическими выбросами увеличивает минерализацию органического вещества в почвах. Потери углерода в газообразном состоянии больше в почвах легкого гранулометрического состава с низким содержанием гумуса. Например, если в незагрязненной серой лесной почве потери углерода с паром за 3 года составили 6.5, а в загрязненной — 9.3%, то в аллювиальной почве они достигли 18.5%. В дерново-луговой почве, характеризующейся благоприятными свойствами и высокой устойчивостью к загрязнениям, потери были меньше (7.2%). Эмиссия  $\text{CO}_2$  за вегетационный период в контрольной не загрязненной серой лесной почве составила  $131 \text{ г}/\text{м}^2$ , а при ее загрязнении фторидами — всего  $123 \text{ г}/\text{м}^2$ . В загрязненной аллювиальной почве эти показатели снижались до  $110 \text{ г}/\text{м}^2$ , но при этом увеличивались до  $150 \text{ г}/\text{м}^2$  в дерново-луговой почве вне зависимости от ее загрязнения. Эксперименты показали обратную зависимость между интенсивностью потерь газообразного углерода и запасами гумуса в загрязненных почвах, что согласовалось с представлениями об устойчивости органического вещества почв к минерализации [6].

Интенсификация процессов минерализации в загрязненных почвах подтверждена исследовани-

ями баланса и циркуляции азота с использованием изотопа <sup>15</sup>N. Изменение относительного содержания С-биомассы свидетельствовало о повышении подвижности органических веществ в загрязненных аллювиальных и серых лесных почвах. Изменения, по всей вероятности, были связаны с неспецифическими адаптивными реакциями почвенного микробного комплекса в условиях загрязнения [7]. Интенсификация процессов минерализации могла быть связана с увеличением доли грибов в микробном сообществе. По многочисленным данным, они более устойчивы к заражению по сравнению с бактериями и актиномицетами. Поступление в почву органических веществ техногенного происхождения также могло сказаться на интенсификации процессов минерализации за счет “стимулирующего эффекта”. Например, известен факт увеличения эмиссии CO<sub>2</sub> из почв при низких концентрациях бенз(а)пирена [8].

Комплексное загрязнение почвы влияет не только на биологические, но и на физические и химические процессы. Известно, что при техногенном загрязнении почв фторидами, органическими соединениями и другими загрязняющими веществами возможно разрушение органо-минеральных комплексов, связанное с пептизацией коллоидов, в результате чего происходит деградация гумуса и ухудшается структура пахотных почв.

Однако в условиях сильного загрязнения почвы, как правило, наблюдают подавление минерализации органических веществ и снижение выбросов CO<sub>2</sub> — данный факт можно считать установленным еще в конце прошлого века [9–13].

В условиях континентального климата Сибири наибольшая часть углекислого газа из почв агроэкосистем поступает в атмосферу в безморозный период. Выбросы в зимнее время не превышают 1–2% от общего годового производства CO<sub>2</sub>. Наблюдения показывают, что в условиях Прибайкалья (Россия) суммарная эмиссия CO<sub>2</sub> из почв за вегетационный период составляет 80–90% годового стока. Исходя из этого, можно дать приблизительную оценку поступления CO<sub>2</sub> из почв в агроэкосистемы и сопоставить его с прямыми антропогенными выбросами. По расчетам авторов [6], общие выбросы CO<sub>2</sub> из почв в агроэкосистемы в зоне воздействия локального загрязнения ОАО “Саянскхимпром” достигают 48 тыс. т/год, что в 6.6 раза превышает промышленные выбросы.

Благодаря развитым механизмам поддержания гомеостаза (численно и избыточный по числу видов микробный пул, полифункциональность,

дублирование и обратимость микробиологических процессов и др.) почвенный микробный комплекс динамично реагирует на изменение факторов внешней среды. Совокупность реакций, поддерживающих функциональную устойчивость системы при внешних воздействиях, можно рассматривать как адаптацию. Существует прямая зависимость между содержанием С-биомассы и способностью микробного комплекса к адаптации. Чем больше численность и биомасса микроорганизмов, тем выше способность сообщества к выживанию в неблагоприятных условиях.

При этом негативное влияние загрязнения почв, соответствующее “приемлемому” уровню, проявляется в снижении устойчивости почвенного микробного комплекса, особенно в почвах с низким содержанием гумуса. Увеличение энергозатрат в результате приспособления к изменяющимся условиям среды на уровне клетки, популяции и микробного сообщества способствует увеличению минерализации, эмиссии CO<sub>2</sub> и уменьшению содержания органического вещества в почвах.

Рекультивация почв, загрязненных тяжелыми металлами, возможна благодаря различным технологиям, например, с применением торфа и органического компоста [14]. Компост или компостирование широко исследовано в связи с загрязнением сельскохозяйственных почв тяжелыми металлами и быстрым ростом органических отходов. Компост богат питательными веществами, гуминовыми веществами и микроорганизмами; его можно добавлять в сельскохозяйственные почвы в качестве удобрения для повышения их плодородия и стимулирования роста сельскохозяйственных культур и микроорганизмов, а также в качестве мелиоранта для уменьшения загрязнения тяжелыми металлами.

Как было отмечено выше, уровень (ре)иммобилизации азота связан с образованием микробной биомассы. Однако, если принять во внимание, что синтез новообразованных веществ сопровождается более активной минерализацией вследствие высокой подвижности данных веществ, их значительного накопления в почве может не произойти. Снижение (ре)иммобилизации азота, характерное для загрязненных почв, отчасти связано не с торможением процессов, а вероятно, с усилением рециркуляции новообразованных веществ. Активное вовлечение новообразований в процессы минерализации–иммобилизации зависит от повышенной потребности микробного комплекса в субстрате в условиях стресса. В результате в повторном синтезе участвует только часть новообразованных углерод- и азотсодержа-

щих веществ, а другая часть (возможно, более значительная) выбрасывается в атмосферу.

В ходе полевых экспериментов на серой лесной среднесуглинистой почве юга Сибири (Россия) применение технологии рекультивации почв запашкой сидератов привело к увеличению выбросов  $\text{CO}_2$ . В случае с сидератами за вегетационный период (май–сентябрь) из почвы выдвинулось в 1.3–1.6 раза больше  $\text{CO}_2$ , чем из почв, подверженных традиционной обработке, что можно объяснить интенсивной минерализацией свежего органического вещества [15].

Таким образом, на эмиссию  $\text{CO}_2$  влияют региональные особенности почв и гидротермические условия наряду с антропогенными и техногенными воздействиями на агроэкосистемы. Ее увеличение в техногенно-загрязненных почвах связано с повышенной минерализацией органического вещества, которая может привести к распаду и уменьшению запасов гумуса. Можно предположить, что в условиях загрязнения увеличение потерь углерода зависит от изменения метаболизма почвенных микроорганизмов.

*Рекультивация переувлажненных и/или переосушенных почв.* В ряде регионов с чрезмерной влажностью добыча торфа осуществляется путем осушения торфяников. При использовании остаточных торфяных отложений (толщина торфа 1.0–1.5 м) после осушения, вспашки и использования почвы под сенокосы важно оценить величину выбросов  $\text{CO}_2$ . В работе [16] потоки  $\text{CO}_2$  измеряли с помощью динамических камер: при нетронутой растительности *NEE* (чистый экосистемный обмен) измерялся как поток  $\text{CO}_2$  между экосистемой и атмосферой (на единицу площади почвы,  $\text{г CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$ ), *R<sub>eco</sub>* (дыхание экосистемы) – как поступление  $\text{CO}_2$  из экосистемы в атмосферу, определяемое дыханием корней и надземных частей растений, а также почвенных гетеротрофов (на единицу площади почвы,  $\text{г CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$ ), а при его удалении рассчитывали *R<sub>soil</sub>* (дыхание почвы) как поступление  $\text{CO}_2$  из почвы в атмосферу, определяемое дыханием корней растений и почвенных гетеротрофов (на единицу площади почвы,  $\text{г CO}_2/\text{м}^2/\text{ч}$ ). Для моделирования потоков  $\text{CO}_2$  использовали их связи с температурой почвы и воздуха, уровнем почвенных и грунтовых вод, фотосинтетически активным излучением, подземной и надземной фитомассой растений. Параметризацию моделей проводили с учетом устойчивости коэффициентов, оцениваемых методом статистического моделирования (Bootstrap). Были проведены численные эксперименты для оценки влияния раз-

личных способов сенокоса на величину *NEE*. Установлено, что суммарный показатель *NEE* за сезон (с 15 мая по 30 сентября) достоверно не различался для сенокоса без укоса ( $K_0$ ) и залежных земель, составив  $4.5 \pm 1.0$  и  $6.2 \pm 1.4$  т С/га/сезон соответственно. Таким образом, оба объекта были источником выбросов углекислого газа в атмосферу. Однократный укос сена за сезон ( $K_1$ ) приводил к увеличению *NEE* до  $6.5 \pm 0.9$ , а двукратный ( $K_2$ ) – до  $7.5 \pm 1.4$  т/га/сезон. Как при  $K_1$ , так и при  $K_2$  потери углерода незначительно увеличивались по сравнению с  $K_0$  и оказались близкими к показателям залежи. При этом накопленный растениями углерод частично преобразовался при скашивании в сельскохозяйственную продукцию (количество скошенной фитомассы при  $K_1$  и  $K_2$  составило  $0.8 \pm 0.1$  и  $1.4 \pm 0.1$  т/га/сезон соответственно), хотя значительная его часть возвращалась в атмосферу при отмирании и последующем разложении растений.

По данным полевых измерений потоков  $\text{CO}_2$ , результаты моделирования показали, что при экстенсивном использовании (без внесения удобрений, орошения, посева трав и т.п.) баланс  $\text{CO}_2$  сенокосных угодий будет незначительно отличаться от баланса залежных торфяников, особенно с учетом растительной фитомассы, изъятой во время сенокоса. Неиспользуемые сенокосные угодья на осушенных торфяниках являются источником выбросов  $\text{CO}_2$  в атмосферу, и их возврат в сельскохозяйственный оборот может перевести часть “бесполезных” выбросов  $\text{CO}_2$  в сельскохозяйственную продукцию.

Также отмечено, что увлажнение подсушенных и оттаивание мерзлых почв привело к резкому, но кратковременному увеличению скорости выделения С- $\text{CO}_2$  в 2.7–12.4 и 1.6–2.7 раза соответственно по сравнению с постоянными условиями инкубации. По мере истощения почвы потенциально минерализованным органическим веществом интенсивность импульсов С- $\text{CO}_2$ , инициированных разрушающими воздействиями, уменьшалась. Совокупное дополнительное продуцирование С- $\text{CO}_2$  почвами природных ландшафтов за 6 циклов составило 21–40% случаев с постоянными условиями инкубации, а продуцирование С- $\text{CO}_2$  окультуренными землями, в том числе почвами, постоянно находящимися под чистым паром, – 45–82%. Содержание потенциально минерализованного органического вещества в почвах, подвергнутых многократному осушению–увлажнению–замораживанию–оттаиванию, уменьшилось в 1.6–4.4 раза по сравнению с почвами, не пострадавшими от нарушающих

воздействий, а константы скорости минерализации уменьшились в 1.9–3.6 раза. Подчеркнуто, что кумулятивный эффект циклов высушивания–увлажнения–замораживания–оттаивания проявляется не столько в уменьшении общего содержания C<sub>орг</sub> в почве, сколько в снижении потенциала минерализации органического вещества почвы [17].

В целом можно сделать вывод, что для моделирования потоков CO<sub>2</sub> в сельскохозяйственных системах успешно применяют:

- балансовый подход – для определения динамики CO<sub>2</sub> в наземных экосистемах в различных масштабах [18];

- картографический метод – наложение разных типов карт для интегрирования потоков CO<sub>2</sub> в пахотных почвах [19, 20];

- геоинформационный анализ – для оценки поглощения CO<sub>2</sub> лесами и потенциального запаса углерода в растительном покрове [21];

- регрессионные зависимости выбросов CO<sub>2</sub> от гидротермических или почвенно-климатических параметров окружающей среды [22, 23].

Рассмотрены следующие трудности, возникающие при использовании математических методов для описания углеродного цикла: множественность методов расчета, высокие требования к входным данным, ограниченная доступность входящей информации, необходимость учета изменений климата, ошибки в описании функциональной зависимости выделения CO<sub>2</sub> от температуры. Необходимо проанализировать проблемы количественной оценки компонентов углеродного биогеохимического цикла, т.е. двойственную роль почвы как поглотителя углерода и источника углеродных соединений, являющихся парниковыми газами, а также взаимодействие углеродного и азотного циклов, разделение фонда почвенного органического углерода на фракции и особенно соотношение микробного и корневого дыхания. Дальнейшее развитие полученных моделей позволит лучше оценить потоки парниковых газов, правильно определить влияние на них климатических и антропогенных факторов и разработать стратегию снижения их выбросов [24].

#### АГРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ МИКРОБИОМАМИ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Различные биогеохимические технологии основаны на принципах управления микробными сообществами в почвах. Основные стратегии кон-

троля микроорганизмов в почве можно условно охарактеризовать как *r*-виды с низкой эффективностью использования субстрата, быстро растущие на легкодоступных соединениях, и *K*-стратегии – медленно, но эффективно минерализующие труднодоступный углерод (в том числе гуминовые вещества). Доказано, что преобладание в микробном сообществе видов с *r*- или *K*-стратегией определяет скорость процессов роста, а конкурентные отношения микроорганизмов с разными стратегиями роста лежат в основе механизмов эмиссии, секвестрации и круговорота почвенного углерода. Воздействие таких стрессовых факторов внешней среды как повышенное содержание углекислого газа приводит к увеличению доли быстрорастущих микроорганизмов в сообществе. И наоборот, при загрязнении тяжелыми металлами, а также при дефиците влаги микроорганизмы с *K*-стратегией получают экологическое преимущество. Повышение уровня загрязнения приводит к значительному снижению максимальной удельной скорости роста и к преобладанию микроорганизмов с *K*-стратегией в микробных сообществах техногенно загрязненных почв. В целом смена преобладающей экологической стратегии почвенного микробного сообщества является механизмом адаптации почвенных микроорганизмов к изменениям экологической ситуации [7].

Биогеохимические технологии, представленные в табл. 2, регулируют эффективность микробного звена биогеохимических циклов в агроэкосистемах. Как правило, эти технологии предусматривают использование различных минеральных и органических удобрений, мелиорантов и сельскохозяйственных отходов. Проблема разработки и внедрения инновационных, осуществимых и экологически безопасных природоподобных технологий, направленных на увеличение запасов углерода (C) и существенное снижение выбросов парниковых газов (ПГ) на всех сельскохозяйственных угодьях, в том числе рисоводческих, имеет решающее значение.

В частности, в ходе полевых испытаний, проведенных в провинции Хунань, Китай, было установлено, что секвестрация углекислого газа (CO<sub>2</sub>) корнями растений риса зависит от кремниевых (Si) удобрений. Количество дополнительно секвестрированного CO<sub>2</sub> зависело от содержания доступного для растений кремния в агрохимикатах, частоты и продолжительности их применения и гранулометрического состава почвы [25].

Полученные данные свидетельствовали о том, что кремниевые удобрения способствуют процессу секвестрации углерода и снижению эмиссии

**Таблица 2.** Технологии управления микробным звеном биогеохимических циклов в агроэкосистемах

| Технология                                                                                                                                               | Технологические принципы                                                                            | Ссылка                                               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Метод подготовки проб для изотопного анализа азота                                                                                                       | Оценка изотопных параметров микробной минерализации                                                 | Авторское свидетельство СССР № 1043565, 1982 г. [26] |
| Метод определения азотминерализующей способности почв                                                                                                    | Оценка минерализующей способности почв                                                              | Авторское свидетельство СССР № 1206703, 1983 г. [27] |
| Способ оценки биodeградации пестицидов                                                                                                                   | Оценка восстановления естественной микрофлоры                                                       | Авторское свидетельство СССР № 5005241, 1991 г. [28] |
| Метод оценки степени очищенности почвы от остатков пестицидов                                                                                            | Реабилитация загрязненных почв                                                                      | Авторское свидетельство СССР № 1836636, 1994 г. [29] |
| Метод прогнозирования поведения азота в агроэкосистемах                                                                                                  | Оценка минерализующей способности почв                                                              | Авторское свидетельство СССР № 1753415, 1995 г. [30] |
| Биогеохимический мониторинг и оценка режимов функционирования агроэкосистем в случае с техногенно загрязненными почвами                                  | Реабилитация загрязненных почв                                                                      | [6, 11]                                              |
| Метод контроля очистки почв, загрязненных углеводородами, и обезвреживания углеводородного шлама посредством анализа активности каталазы                 | Реабилитация загрязненных почв                                                                      | Патент РФ на изобретение № 2387995, 2010 г. [31]     |
| Метод контроля очистки почв, загрязненных углеводородами, и обезвреживания углеводородного шлама посредством анализа активности дегидрогеназы            | Восстановление микробного звена биогеохимического цикла при рекультивации загрязненных почв         | Патент РФ на изобретение № 2387996, 2010 г. [32]     |
| Метод контроля эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв различного гранулометрического состава посредством анализа активности дегидрогеназы | Восстановление микробного звена биогеохимического цикла при рекультивации нарушенных тундровых почв | Патент РФ на изобретение № 2491137, 2013 г. [33]     |
| Метод оценки эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв различной водоудерживающей способности торфом                                         | Восстановление микробного звена биогеохимического цикла при рекультивации нарушенных тундровых почв | Патент РФ на изобретение № 2611159, 2017 г. [34]     |
| Метод получения гумата калия из местного торфа Ямало-Ненецкого автономного округа                                                                        | Восстановление микробного звена биогеохимического цикла при рекультивации нарушенных тундровых почв | Патент РФ на изобретение № 2610956, 2017 г. [35]     |
| Метод оценки эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв внесением местного торфа и гумата калия                                               | Восстановление микробного звена биогеохимического цикла при рекультивации нарушенных тундровых почв | Патент РФ на изобретение № 2611165, 2017 г. [36]     |
| Метод диагностики хронического и случайного загрязнения почв тяжелыми металлами посредством анализа активности фермента дегидрогеназы                    | Восстановление микробного звена биогеохимического цикла при рекультивации загрязненных почв         | Патент РФ на изобретение № 2617533, 2017 г. [37]     |

Таблица 2. Окончание

| Технология                                                                                                                                      | Технологические принципы                                                                                                                                                                                                                                                        | Ссылка                                           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| Метод биохимического контроля эффективности рекультивации нарушенных и загрязненных тундровых почв                                              | Восстановление микробного звена биогеохимического цикла при рекультивации нарушенных тундровых почв                                                                                                                                                                             | Патент РФ на изобретение № 2672490, 2018 г. [38] |
| Метод определения источника и времени загрязнения окружающей среды и биологических субстратов человека пестицидом ДДТ в районах Крайнего Севера | Восстановление микробного звена биогеохимического цикла при рекультивации загрязненных почв                                                                                                                                                                                     | Патент РФ на изобретение № 2701554, 2019 г. [39] |
| Метод определения микробного загрязнения водной среды посредством анализа активности фермента дегидрогеназы                                     | Оценка восстановления природной микрофлоры при загрязнении водных экосистем                                                                                                                                                                                                     | Патент РФ на изобретение № 2735756, 2020 г. [40] |
| Известково-фосфогипсовый мелиорант                                                                                                              | Восстановление микробного звена биогеохимического цикла при рекультивации деградированных почв                                                                                                                                                                                  | [41]                                             |
| Секвестрация углерода корнями риса при удобрении кремнием                                                                                       | Инновационные, осуществимые, экологически безопасные природоподобные технологии, направленные на увеличение накопления углерода и значительное сокращение выбросов парниковых газов на всех сельскохозяйственных угодьях, в том числе рисоводческих, за счет применения кремния | [25]                                             |

ПГ при возделывании риса. Их применение обеспечило повышение урожайности риса на 12.1–71.2% и фиксации CO<sub>2</sub> корневой системой в объеме 0.95–14.9 т/га за один сезон. Возврат углерода в почву и воспроизводство плодородия можно обеспечить за счет усиленного развития корневой системы растений и увеличения количества корневых остатков после сбора урожая. Агрохимикаты, содержащие доступный для растений кремний, следует включить в технологию реализации 4R-СТРАТЕГИИ минерального питания сельскохозяйственных культур.

Следует подчеркнуть, что перечень биогеохимических технологий, представленный в табл. 2, далеко не исчерпывающий. Сюда можно также отнести различные подходы, способствующие восстановлению дикорастущей микрофлоры, например, при загрязнении сельскохозяйственных почв тяжелыми металлами и нефтепродуктами [42], а также другие приемы и методы, направленные на регулирование биогеохимической структуры агроэкосистем в целом.

Поэтому необходим мониторинг всех составляющих биогеохимических циклов углерода и азота, от микробного звена до человека, замыкающего пищевые трофические цепи. Важно понимать и оценивать экономические и социальные аспекты как выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу, так и воздействия повышенных концентраций этого газа на здоровье человека. В этом случае заслуживают внимания подходы, используемые при экономической оценке воздействия промышленных выбросов газов на здоровье человека в различных провинциях Китая [43].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ современной литературы показал, что агроэкосистемы в большинстве случаев являются чистым источником CO<sub>2</sub>, а секвестрация происходит только при переводе сельскохозяйственных угодий в залежь. Микробное звено биогеохимических циклов в агроэкосистемах обуславливает процессы эмиссии CO<sub>2</sub>, секвестрации и трансформации соединений углерода в почвах. Среди

факторов управления этим микробным звеном можно отметить следующие:

- внесение минеральных и органических удобрений;
- направленность процессов минерализации органических веществ почвы и методы регулирования сопряженной углерод- и азотминерализующей способности почв;
- изменение продуктивности агроэкосистем в условиях повышения концентрации углекислого газа в атмосфере и почвенном воздухе;
- агротехнологические приемы, в том числе применение нулевой обработки почвы, органических удобрений различной природы, а также различных мелиорантов, в том числе фосфогипса;
- рекультивация нарушенных и загрязненных почв, переувлажненных и/или переосушенных почв, влияющих на потоки  $\text{CO}_2$ .

При этом следует оценивать методы, направленные на снижение потоков  $\text{CO}_2$  при использовании удобрений в цикле “производство—внесение”. Существующая практика внедрения низкоуглеродных сельскохозяйственных технологий (НСХТ) пока не может свидетельствовать об их применимости для обеспечения как пищевой, так и экологической безопасности. Необходимы дальнейшее развитие и использование агрогеохимических технологий, направленных на восстановление биогеохимических циклов в агроэкосистемах, прежде всего в микробном звене, регулирующем потоки  $\text{CO}_2$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bashkin V., Alekseev A., Levin B., Mescherova E.* Biogeochemical technologies for managing  $\text{CO}_2$  flows in agroecosystems // *Adv. Environ. Eng. Res.* 2023. V. 4(1). P. 012.  
<https://doi.org/10.21926/aeer.2301012>
2. Biogeochemical technologies for managing pollution in polar ecosystems / Ed. Bashkin V. // *Environ. Pollut.* V. 26. Switzerland: Springer, 2016. 219 pp.
3. Ecological and biogeochemical cycling in impacted polar ecosystems / Ed. Bashkin V. N.Y.: NOVA Publishers, 2017. 308 p.
4. *Bashkin V.N., Galiulin R.V.* Geoeological risk management in polar areas // *Environ. Pollut.* V. 28. Switzerland: Springer, 2019. 155 p.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-04441-1>
5. *Матышак Г.В., Тархов М.О., Рыжова И.М., Гончарова О.Ю., Сефилян А.Р., Чуванов С.В., Петров Д.Г.* Температурная чувствительность истечения  $\text{CO}_2$  с поверхности бугристых торфяников Северо-Западной Сибири при оценке трансплантационным методом // *Почвоведение.* 2021. № 7. С. 815–826.  
<https://doi.org/10.31857/S0032180X21070108>
6. *Помазкина Л.В., Котова Л.Г., Лубнина Е.В.* Биогеохимический мониторинг и оценка режимов функционирования агроэкосистем в случае с техногенно загрязненными почвами. Новосибирск: Наука, 1999. 207 с.
7. *Благодатская Е.В., Семенов М.В., Якушев А.В.* Активность и биомасса почвенных микроорганизмов в изменяющихся условиях окружающей среды. М.: Товарищ-во научн. изд. КМК, 2016. 243 с.
8. *Галиулин Р.В., Башкин В.Н., Галиулина Р.А., Лебедев А.Р.* Оценка загрязнения почв бенз(а)пиреном и их биологической активности // *Агрохимия.* 1993. № 12. С. 62–65.
9. *Doelman P., Haanstra L.* Effect of lead on soil respiration dehydrogenase activity // *Soil Biol. Biochem.* 1979. V. 11. P. 475–479.
10. *Chang F.H., Broadbent F.E.* Influence of trace metals on carbon dioxide evolution from a yolo soil // *Soil Sci.* 1981. V. 132. P. 416–421.
11. *Помазкина Л.В., Лубнина Е.В., Зорина С.Ю., Котова Л.Г.* Динамика выделения  $\text{CO}_2$  серой лесной почвой в лесостепи Прибайкалья // *Почвоведение.* 1996. Т. 23. С. 327–331.
12. *Aoyama M., Itaya S., Otowa M.* Effect of copper on the decomposition of plant residues, microbial biomass and B-glucosidase activity in soils // *Soil Sci. Plant Nutr.* 1993. V. 39. P. 557–566.
13. *Звягинцев Д.Г., Кураков А.В., Умаров М.М., Филипп З.* Микробиологические и биохимические показатели загрязнения свинцом дерново-подзолистых почв // *Почвоведение.* 1997. № 9. С. 1124–1131.
14. *Mei Huang, Yi Zhu, Zhongwu Li, Bin Huang, Ninglin Luo, Chun Liu, Guangming Zeng.* Compost as a soil amendment to remediate heavy metal-contaminated agricultural soil: mechanisms, efficacy, problems, and strategies // *Water Air Soil Pollut.* 2016. V. 227. P. 359.  
<https://doi.org/10.1007/s11270-016-3068-8>
15. *Соколова Л.Г., Зорина С.Ю., Белоусова Е.Н.* Эмиссия  $\text{CO}_2$  из почвы при введении кратковременной сидерации в паровое поле в условиях лесостепной зоны Прибайкалья // *Почвоведение.* 2021. № 10. С. 1262–1273.  
<https://doi.org/10.31857/S0032180X2110011>
16. *Ильясов Д.В., Молчанов А.Г., Глаголев М.В., Суворов Г.Г., Сирип А.А.* Моделирование нетто-экосистемного обмена углекислым газом сенокоса на осушенной торфяной почве: анализ сценариев землепользования // *Компьют. исслед-я и моделир.* 2020. № 12. С. 1427–1449.  
<https://doi.org/10.20537/2076-7633-2020-12-6-1427-1449>
17. *Семенов В.М., Козум Б.М., Лукин С.М.* Влияние повторяющихся циклов высыхания—увлажнения—замораживания—оттаивания на активный пул органического вещества почвы // *Почвоведение.* 2014. № 4. С. 443–454.  
<https://doi.org/10.7868/S0032180X14040078>
18. *Houghton R.A., House J.I., Pongratz J., van der Werf G.R., DeFries R.S., Hansen M.C., Le Quere C., Ramankutty N.* Carbon emissions from land use and land-cover change // *Biogeosciences.* 2012. V. 9. P. 5125–5142.  
<https://doi.org/10.5194/bg-9-5125-2012>

19. Потоки и пулы углерода в наземных экосистемах России / Под ред. Заварзина Г.А. М.: Наука, 2007. 315 с.
20. *Smith J., Smith P., Wattenbach M., Gottschalk P., Romanenkov V.A., Shevtsova L.K., Sirotenko O.D., Rukhovich D.I., Koroleva P.V., Romanenko I.A., Lisovoi N.V.* Projected changes in the organic carbon stocks of croplands mineral soils of European Russia and the Ukraine, 1990–2000 // *Global Change Biol* 2007. V. 13. P. 342–356.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01297.x>
21. *Солодянкина С.В., Черкашин А.К.* Экономическая ГИС-оценка способности растительности к нейтрализации антропогенных выбросов углекислого газа на юге Восточной Сибири // *Вестн. НГУ. Сер. Информ. технол.* 2014. № 2. С. 99–108.
22. *Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Щерба Т.И., Шнырев Н.А.* Абиотические факторы почвенного дыхания // *Экол. вестн. Север. Кавказа*. 2010. № 1. С. 5–13.
23. *Chen S., Zou J., Hu Z., Chen H., Lu Y.* Global annual soil respiration in relation to climate, soil properties and vegetation characteristics: Summary of available data // *Agric. For. Meteorol.* 2014. V. 198–199. P. 335–346.  
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.08.020>
24. *Суховеева О.Е.* Проблемы моделирования биогеохимического цикла углерода в агроландшафтах // *Уч. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки*. 2020. Т. 162. С. 473–501.  
<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2020.3.473-501>
25. *Чжао Дань-дань, Чжан Пэн-бо, Бочарникова Е.А., Матиченков В.В., Хомяков Д.М., Пахненко Е.П.* Оценка секвестрации углерода корнями риса при удобрении кремнием // *Вестн. МГУ. Сер. почвовед.* 2019. № 3. С. 17–22.
26. *Башкин В.Н., Кудяров В.Н., Кузнецова Т.В.* Метод подготовки проб для изотопного анализа азота. А.с. СССР № 1043565 // *Б.И.* 1982.
27. *Башкин В.Н., Кудяров В.Н.* Метод определения азот-минерализующей способности почв. А. с. СССР № 1206703 // *Б. И.* 1983.
28. *Васильева Г.С., Башкин В.Н., Хомутов С.М., Орлинский Д.Б.* Метод оценки биоразложения пестицидов. А. с. СССР № 5005241 // *Б. И.* 1991.
29. *Васильева Г.С., Башкин В.Н., Хомутов С.М., Орлинский Д.Б.* Метод оценки степени очищенности почвы от остатков пестицидов. А. с. СССР № 1836636 // *Б. И.* 1994.
30. *Башкин В.Н., Головнина Н.О.* Метод прогнозирования поведения азота в агроэкосистемах. А. с. СССР № 1753415 // *Б. И.* 1995.
31. *Башкин В.Н., Бухгалтер Е.Б., Галиулин Р.В., Коняев С.В., Калинина И.Е., Галиулин Р.А.* Метод контроля очистки почв, загрязненных углеводородами, и обезвреживания углеводородного шлама посредством анализа активности каталазы. Пат. № 2387995, РФ. 27.04.2010.
32. *Башкин В.Н., Бухгалтер Е.Б., Галиулин Р.В., Коняев С.В., Калинина И.Е., Галиулин Р.А.* Метод контроля очистки почв, загрязненных углеводородами, и обезвреживания углеводородного шлама посредством анализа активности дегидрогеназы. Пат. № 2387996, РФ. 27.04.2010.
33. *Арно О.Б., Араб А.К., Башкин В.Н., Галиулин Р.В., Галиулина Р.А., Маклюк О.В., Припутина И.В.* Метод контроля эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв различного гранулометрического состава посредством анализа активности дегидрогеназы. Пат. № 2491137, РФ. Зарег. в Гос. реестре изобр. РФ 27.08.2013.
34. *Арно О.Б., Арабский А.К., Башкин В.Н., Галиулин Р.В., Галиулина Р.А., Алексеев А.О., Салбиев Т.Х.-М., Серебряков Е.П.* Метод оценки эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв с разной общей влагоемкостью торфом. Пат. № 2611159, РФ. // *Б.И.* № 6. 21.02.2017.
35. *Арно О.Б., Арабский А.К., Башкин В.Н., Галиулин Р.В., Алексеев А.О., Галиулина Р.А., Мальцева А.Н., Ямников С.А., Николаев Д.С., Мурзагулов В.Р.* Метод получения гумата калия из местного торфа Ямало-Ненецкого автономного округа. Пат. № 2610956, РФ // *Б.И.* № 5. 17.02.2017.
36. *Арно О.Б., Арабский А.К., Башкин В.Н., Галиулин Р.В., Галиулина Р.А., Алексеев А.О., Ямников С.А., Николаев Д.С., Мурзагулов В.Р.* Метод оценки эффективности рекультивации нарушенных тундровых почв внесением местного торфа и гумата калия. Пат. № 2611165, РФ // *Б.И.* № 6. 21.02.2017.
37. *Арно О.Б., Арабский А.К., Башкин В.Н., Галиулин Р.В., Галиулин Р.А.* Метод диагностики хронического и случайного загрязнения почв тяжелыми металлами посредством анализа активности фермента дегидрогеназы. Пат. № 2617533, РФ // *Б.И.* № 12. 25.04.2017.
38. *Арно О.Б., Арабский А.К., Башкин В.Н., Галиулин Р.В., Галиулина Р.А., Соловищук Л.А., Маклюк О.В.* Метод биохимического контроля эффективности рекультивации нарушенных и загрязненных тундровых почв. Пат. № 267249, РФ // *Б.И.* № 32. 15.11.2018.
39. *Арно О.Б., Арабский А.К., Башкин В.Н., Галиулин Р.В., Галиулин Р.А.* Метод определения источника и времени загрязнения окружающей среды и биологических субстратов человека пестицидом ДДТ в районах Крайнего Севера. Пат. № 2701554, РФ // *Б.И.* № 28. 30.09.2019.
40. *Арно О.Б., Арабский А.К., Башкин В.Н., Галиулин Р.В., Галиулина Р.А., Соловищук Л.А., Маклюк О.В., Мурзагулов В.Р., Линник А.И.* Метод определения микробного загрязнения водной среды посредством анализа активности фермента дегидрогеназы. Пат. РФ на изобр. № 2735756, РФ // *Б. И.* № 31. 06.11.2020.
41. *Poblete-Grant P., Cartes P., Pontigo S., Biron P., Mora M.D., Rumpel C.* Phosphorus fertiliser source determines the allocation of root-derived organic carbon to soil organ-

- ic matter fractions // *Soil Biol Biochem.* 2022. V. 167. P. 108614.
42. *Bashkin V.N.* Biogeochemical engineering: Technologies for managing environmental risks // *Adv. Environ. Eng. Res.* 2022. V. 3(4). P. 040.  
<https://doi.org/10.21926/aeer.2204040>
43. *Xu X., Xu Z., Chen L., Li C.* How does industrial waste gas emission affect health care expenditure in different regions of China: An application of bayesian quantile regression // *Inter. J. Environ. Res. Public. Health.* 2019. V. 16. P. 2748.  
<https://doi.org/10.3390/ijerph16152748>

## **Agrogeochemical Technologies for Managing CO<sub>2</sub> Flows in Agroecosystems. Message 2. Restoration of the Microbial Link of the Agrogeochemical Cycle**

**V. N. Bashkin<sup>a, #</sup> and R. A. Galiulina<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> *Institute of Physicochemical and Biological Problems of Soil Science of the RAS  
Institutskaya ul. 2, Moscow district, Pushchino 142290, Russia*

<sup>b</sup> *Institute of Fundamental Problems of Biology of the RAS  
Institutskaya ul. 2, Moscow region, Pushchino 142290, Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: vladimirbashkin@yandex.ru*

The application of agrogeochemical technologies aimed at restoring agrogeochemical cycles in agricultural ecosystems, primarily in the microbial link regulating CO<sub>2</sub> flows, is considered. Examples of recultivation of disturbed and polluted soils, waterlogged and/or over-dried soils are given and their impact on the amount of CO<sub>2</sub> flux is estimated. A complex of agrogeochemical technologies aimed at assessing and stabilizing the microbial link of the biogeochemical cycle in agroecosystems is presented. Examples of the use of these technologies for the regulation of CO<sub>2</sub> emissions in agroecosystems are given. Using one of these technologies, an almost 5-fold decrease in the rate of CO<sub>2</sub> flows during the reclamation of disturbed pasture ecosystems of the tundra is shown. It is necessary to further develop and use agrogeochemical technologies aimed at restoring biogeochemical cycles in agroecosystems, primarily in the microbial link regulating CO<sub>2</sub> flows.

**Keywords:** agroecosystems, CO<sub>2</sub> fluxes, microbocenoses, regulatory factors, fertilizers, agrogeochemical technologies.