

ISSN 0002-1881

Номер 9

Сентябрь 2023



# АГРОХИМИЯ

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



---

---

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Номер 9, 2023

---

---

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

### Плодородие почв

Изменение показателей эффективного плодородия почв Каменной Степи под влиянием лесных полос различной ландшафтной принадлежности

*Ю. И. Чевердин, В. А. Беспалов, Т. В. Титова*

3

Плодородие выщелоченного чернозема как результат 85-летнего применения удобрений в зерносвекловичном севообороте в условиях ЦЧР

*О. А. Минакова, Л. В. Александрова, Т. Н. Подвигина*

14

---

### Удобрения

Влияние длительного применения соломы и сидератов на серой лесной почве на продуктивность агроценозов

*И. Б. Сорокин, С. П. Кулижский, О. А. Пасько, О. Э. Мерзляков*

22

---

### Регуляторы роста растений

Совместное воздействие штамма RGPB *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D и гуминовых веществ на рост, содержание фотосинтетических пигментов и фитогормонов в растениях пшеницы в условиях засухи

*А. В. Феоктистова, М. Д. Тимергалин, Т. В. Рамеев, С. П. Четвериков*

28

---

### Пестициды

Динамика применения пестицидов в Российской Федерации

*В. В. Михайликова, Н. С. Стребкова*

37

Биологическая эффективность баковых смесей препаратов для защиты яровой пшеницы и их влияние на качество зерна

*В. Г. Доронин, Е. Н. Ледовский, И. В. Пахотина, Я. Ф. Молод*

42

---

### Экотоксикология

Содержание токсичных элементов при внесении фосфогипса и помета в агрочернозем слабоэродированный

*И. М. Габбасова, Т. Т. Гаринов, М. А. Комиссаров, О. А. Мелентьева*

50

---

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Адаптация метода аналитического контроля содержания  $\alpha$ -амилазы в зерне тритикале

*Е. К. Барнашова, А. Н. Покидышев, О. В. Слюзова, Ю. С. Гардина, С. В. Жилин, К. А. Тараскин*

56

---

## ОБЗОРЫ

Регуляторы роста и развития растений: классификация, природа и механизм действия

*С. С. Тарасов, Е. В. Михалёв, А. И. Речкин, Е. К. Крутова*

65

Применение минеральных удобрений в лесном хозяйстве и углеродный бюджет лесов

*Д. Г. Щенащенко, Л. В. Мухортова, О. В. Мартыненко, В. Н. Коротков, В. Н. Карминов*

81

---

---

# Contents

---

---

No. 9, 2023

---

---

## EXPERIMENTAL ARTICLES

### Soil Fertility

- Changes in the Indicators of Effective Soil Fertility of the Stone Steppe under the Influence of Forest Strips of Various Landscape Accessories  
*Yu. I. Cheverdin, V. A. Bespalov, T. V. Titova* 3
- Fertility of Leached Chernozem as a Result of 85-year Application of Fertilizers in Grain-Beet Crop Rotation under Conditions of the Central Black-Earth Region  
*O. A. Minakova, L. V. Alexandrova, T. N. Podvigina* 14
- 

### Fertilizers

- Effect of Long-Term Use of Straw and Siderates on Gray Forest Soil on the Productivity of Agroecosystems  
*I. B. Sorokin, S. P. Kulizhskiy, O. A. Pasko, O. E. Merzlyakov* 22
- 

### Plant Growth Regulators

- Combined Effect of PGPR Strains *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D and Humic Substances on the Growth, Content of Photosynthetic Pigments and Phytohormones in Wheat Plants in Drought Conditions  
*A. V. Feoktistova, M. D. Timergalin, T. V. Rameev, S. P. Chetverikov* 28
- 

### Pesticides

- Dynamics of Pesticide Use in the Russian Federation  
*V. V. Mikhaylikova, N. S. Strebkova* 37
- Biological Efficiency of Tank Mixtures of Preparations for the Protection of Spring Wheat and Their Effect on Grain Quality  
*V. G. Doronin, E. N. Ledovskiy, I. V. Pakhotina, Ya. F. Molod* 42
- 

### Ecotoxicology

- Content of Toxic Elements after Introduction of Phosphogypsum and Litter into Slightly Eroded Agrochernozem  
*I. M. Gabbasova, T. T. Garipov, M. A. Komissarov, O. A. Melentyeva* 50
- 

## RESEARCH METHODS

- Adaptation of the Method of Analytical Control of the Content of  $\alpha$ -Amylase in Triticale Grain  
*E. K. Barnashova, A. N. Ostyshev, O. V. Sluzova, Yu. S. Gardina, S. V. Zhilin, K. A. Taraskin* 56
- 

## REVIEWS

- Plant Growth and Development Regulators: Classification, Nature and Mechanism of Action  
*S. S. Tarasov, E. V. Mikhalev, A. I. Rechkin, E. K. Krutova* 65
- Application of Mineral Fertilizers in Forests with Respect to Forest Carbon Budget  
*D. G. Schepaschenko, L. V. Mukhortova, O. V. Martynenko, V. N. Korotkov, V. N. Karminov* 81
- 
-

## ИЗМЕНЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОГО ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВ КАМЕННОЙ СТЕПИ ПОД ВЛИЯНИЕМ ЛЕСНЫХ ПОЛОС РАЗЛИЧНОЙ ЛАНДШАФТНОЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ

© 2023 г. Ю. И. Чевердин<sup>1,\*</sup>, В. А. Беспалов<sup>1</sup>, Т. В. Титова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский федеральный аграрный научный центр им. В.В. Докучаева

397463 Воронежская обл., Таловский р-н, пос. 2-го участка Института им. Докучаева, кварт. 5, 81, Россия

\*E-mail: cheverdin62@mail.ru

Поступила в редакцию 06.03.2023 г.

После доработки 09.04.2023 г.

Принята к публикации 14.06.2023 г.

В рамках программы по тематике государственного задания в 2021–2022 гг. проведены исследования по изменению показателей эффективного плодородия в пространстве и во времени под влиянием лесных полос различной ландшафтной принадлежности (лесная полоса № 40 на водоразделе, лесная полоса № 72 на склоне). Все работы были выполнены в Воронежском ФАНЦ им. В.В. Докучаева. Установлено, что наибольшей обеспеченностью подвижным фосфором и обменным калием характеризовались почвы водораздельного участка. Обеспеченность почв нитратным азотом в течение вегетации на водораздельном и склоновом участках была на одном уровне. Для водораздельного участка было характерно снижение количества минеральных элементов на почвах залежи и опушках лесной полосы № 40. Что касается самой лесной полосы, то максимальные показатели были отмечены в центре лесной полосы, постепенно снижаясь в направлении опушек. Рассматривая показатели плодородия пашни, отметили, что они возрастают при удалении от лесной полосы, их максимум выявлен на расстоянии 75–150 м от лесной полосы. На пашне, прилегающей к прибалочной лесной полосе № 72, отмечено увеличение содержания подвижного фосфора и обменного калия при приближении к лесной полосе. Содержание нитратного азота, наоборот, вниз по склону уменьшалось, достигая минимума вблизи лесной полосы. Доказано, что на водораздельном участке к концу вегетации содержание нитратного азота и обменного калия увеличивалось, подвижного фосфора – уменьшалось. На склоновом участке к концу вегетации происходило увеличение всех исследованных показателей плодородия.

**Ключевые слова:** лесная полоса, водораздел, склон, нитратный азот, подвижный фосфор, обменный калий, плодородие.

**DOI:** 10.31857/S0002188123090041, **EDN:** VAXWHZ

### ВВЕДЕНИЕ

На протяжении прошлого столетия шло интенсивное антропогенное преобразование исходных степных природных зон России в высокоинтенсивные агролесомелиоративные комплексы. В южных регионах в последнее столетие существенно увеличилась доля облесенности территории. Основной целью создания искусственных лесных насаждений служит снижение рисков потери почвенного плодородия, защита от негативного влияния водной, ветровой эрозии почвенного покрова, повышение продуктивности сельскохозяйственных земель [1–5]. Естественно, что со временем изменился характер влияния лесных полос на почвенный покров [6, 7]. В почвах пашни и лесной полосы отмечены различия содержания гумуса, подвижных форм азота, фосфора, ка-

лия [8–14]. Эти изменения обусловлены влиянием лесных полос на характер грунтового увлажнения прилегающих полей, образования переувлажненных почв [15].

Одним из основных факторов, изменивших облик ландшафтов, стало облесение полей и посадка лесных полос различного назначения (водораздельного, прибалочного, противоэрозионного) [16–18].

Существует природная и антропогенная обусловленная неоднородность обеспеченности почв минеральными элементами питания растений. Практически не вошедшим в сферу научных интересов и оставшимся за рамками исследований оказался такой важный вопрос, как изменение показателей эффективного плодородия в зо-

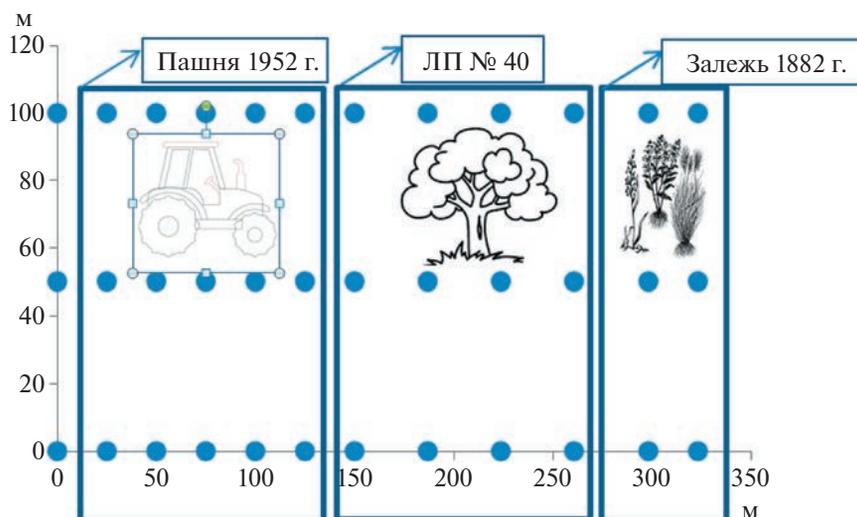


Рис. 1. Схема отбора почвенных проб на водоразделе: ЛП – лесная полоса.

не влияния искусственных лесных насаждений различной ландшафтной принадлежности.

В связи с этим цель работы – оценка изменения показателей плодородия черноземов в пространстве и во времени в результате воздействия лесных полос различной ландшафтной принадлежности.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В 2021–2022 гг. проводили исследование изменений показателей плодородия в пространстве под влиянием лесных полос различной ландшафтной принадлежности (лесная полоса № 40 на водоразделе, лесная полоса № 72 на склоне). Экспериментальный участок возле лесной полосы № 40 включал непосредственно саму лесную полосу, смежную пашню, примыкающую с запада, и косимую залежь, смежную с лесной полосой № 40 с восточной стороны. Прибалочная лесная полоса № 72 расположена внизу склона крутизной до 3°, пахотный участок примыкает к лесонасаждению с западной части и расположен на склоне.

Лесная полоса № 72 – прибалочная, автор посадки Михайлов Н.А., год посадки – 1907, возраст – 115 лет. Состав пород первого яруса – 8Яо2Д (ясень обыкновенный и дуб черешчатый) [19]. В качестве сравнения со склоновым участком изучен водораздельный компонент ландшафта, включавший старовозрастную лесную полосу № 40 1903 г. посадки и примыкающие к ней участки пашни 1952 г. распашки с запада и косимой залежи 1882 г. (ЗК) с востока. Лесополоса

№ 40 примечательна своими размерами. Ее ширина – 106 м, длина – ≈750 м [20].

Наблюдения проводили в течение вегетационного периода. Определяли содержание нитратного азота, подвижного фосфора, обменного калия в слое 0–30 см почвы в свежих почвенных образцах по общепринятой методике (нитратный азот – дисульфифеноловым методом на спектрофотометре СФ-56, подвижный фосфор и обменный калий – по Чирикову из одной вытяжки (по ГОСТ 26204-91).

Схема отбора почвенных проб предусматривала закладку регулярной сетки опробования с удалением от лесной полосы на 0, 25, 50, 75, 100, 125 и 150 м (рис. 1). В каждом ряду закладывали 3 скважины с шагом 50 м. Таким образом, на пашне водораздела и склона схема отбора проб соответствовала сетке 25 × 50 м. На пашне количество точек опробования составило по 18 шт. В лесной полосе № 40 образцы отбирали по сетке с шагом 25 × 37 м (12 точек опробования). На примыкающей к полосе № 40 косимой залежи отбор образцов осуществляли по сетке с шагом 25 × 50 м. Количество точек – 6. Глубина взятия образцов – 30 см.

Экспериментальные данные подвергали статистической обработке корреляционным и дисперсионным методами с помощью программы Microsoft Excel. Для пространственного отображения двумерного распределения показателей эффективного плодородия в пространстве использовали геостатистические возможности пакета Surfer–V.9.0.

**Таблица 1.** Показатели плодородия чернозема лесной полосы № 40 и смежно расположенных с ней пашни и залежи в слое 0–30 см (среднее за 2021–2022 гг.)

Расположение объекта относительно ЛП № 40	N-NO <sub>3</sub> , мг/кг	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N-NO <sub>3</sub> , мг/кг	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
		мг/100 г			мг/100 г	
	начало вегетации			конец вегетации		
Пашня 0 м от ЛП	7.1 ± 0.4	3.5 ± 0.2	20.4 ± 2.5	10.4 ± 1.3	2.7 ± 0.1	13.8 ± 4.5
Пашня 25 м от ЛП	8.7 ± 2.6	16.5 ± 2.2	11.7 ± 1.5	12.7 ± 2.3	15.2 ± 1.2	14.1 ± 0.8
Пашня 50 м от ЛП	8.5 ± 2.1	17.6 ± 2.3	11.3 ± 0.3	14.3 ± 4.3	15.2 ± 2.0	10.8 ± 0.9
Пашня 75 м от ЛП	15.0 ± 2.3	18.7 ± 0.4	12.6 ± 1.7	18.4 ± 2.0	16.1 ± 0.9	14.5 ± 1.8
Пашня 100 м от ЛП	11.9 ± 0.8	18.7 ± 2.4	13.1 ± 0.3	18.7 ± 3.8	16.0 ± 1.8	15.1 ± 1.2
Пашня 125 м от ЛП	11.1 ± 2.0	20.0 ± 1.6	15.0 ± 1.8	16.5 ± 2.8	16.1 ± 1.1	15.2 ± 1.5
Пашня 150 м от ЛП	10.6 ± 1.5	23.6 ± 1.0	13.9 ± 1.2	12.5 ± 1.8	19.6 ± 1.6	14.8 ± 0.7
Западная опушка ЛП	7.1 ± 0.4	3.5 ± 0.2	20.4 ± 2.5	10.4 ± 1.3	2.7 ± 0.1	13.8 ± 4.5
ЛП 40 (центр)	14.5 ± 1.9	10.5 ± 0.7	30.6 ± 7.5	16.1 ± 1.9	9.0 ± 0.9	30.0 ± 2.6
Восточная опушка ЛП	9.4 ± 0.8	7.6 ± 2.5	35.9 ± 7.6	13.5 ± 3.9	4.8 ± 1.1	36.4 ± 5.5
ЗК 25 м от ЛП	6.0 ± 0.6	7.1 ± 3.3	14.0 ± 2.9	6.3 ± 0.7	4.7 ± 1.1	23.7 ± 7.1
ЗК 50 м от ЛП	4.7 ± 0.3	3.6 ± 0.2	13.7 ± 0.5	6.8 ± 0.9	2.9 ± 0.3	5.8 ± 0.6

Примечание. ЛП – лесная полоса, ЗК – залежь косиная. То же в табл. 2.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Интенсивное антропогенное воздействие, включающее в себя распашку степных участков, посадку лесных полос, послужило мощным фактором, изменившим направленность почвенных процессов и оказавшим существенное влияние на обеспеченность черноземов минеральными элементами. Проведенное в 2021–2022 гг. изучение изменения показателей эффективного плодородия в пространстве и во времени под влиянием лесных полос показало различный характер формирования обеспеченности минеральными элементами черноземов в зависимости от ландшафтной принадлежности участка. Можно отметить более высокую обеспеченность черноземов водораздельного участка подвижным фосфором и доступным калием. Количество нитратного азота в течение вегетации на водораздельном и склоновом пахотных участках было примерно на одном уровне.

**Нитратный азот.** Обеспеченность почв нитратным азотом во многом определяет продуктивность сельскохозяйственных растений. По результатам нашего исследования, варьирование его содержания в почве в большей степени зависело от состава биоценоза, характера использования угодий. В меньшей степени количество доступного азота определялось ландшафтной принадлежностью пахотного участка.

Анализ содержания нитратного азота всех объектов показал, что более высокая обеспеченность

им почв была характерна для черноземов пахотных участков. Отмечено закономерное увеличение содержания азота по мере удаления от лесной полосы, достигавшее максимума на удалении 75–100 м –  $15.0 \pm 2.3$  мг/кг. На пашне, прилегающей к лесной опушке, количество доступного азота для растений было низким –  $(7.1 \pm 0.4)$ – $(10.4 \pm 1.3)$  мг/кг (табл. 1).

В почвах лесного ценоза отмечена четкая закономерность максимальной обеспеченности азотом чернозема в центральной части широкой лесной полосы, достигавшей  $(14.5 \pm 1.9)$ – $(16.1 \pm 1.9)$  мг/кг. На опушечной части полосы прослежено существенное снижение содержания нитратного азота, причем более заметное на западной опушке лесной полосы – до  $(7.1 \pm 0.4)$ – $(10.4 \pm 1.3)$  мг/кг. В восточной части содержание нитратного азота изменялось в интервале  $(9.4 \pm 0.8)$ – $(13.5 \pm 3.9)$  мг/кг. Такое пространственное варьирование, по нашему мнению, обусловлено различиями в характере формирования и накопления листового опада, биологической активности и температурного режима различных частей лесной полосы. Во-первых, большая мощность мертвого опада листьев, по нашим данным, формируется в центре широкой лесной полосы и не переносится воздушными массами за ее пределы. На опушках листовая опад формируется в меньшем объеме. Некоторая часть может перемещаться ветровыми массами на прилегающие к лесной полосе участки. Во-вторых, под лесным ценозом отмечен

меньший ход суточных температур, способствующих усилению биологической активности почв и почвенной мезофауны [21], что выражается в усилении их роли в деструкции мертвого органического опада древесной подстилки. И в-третьих, под лесной полосой, особенно в ее центральной части изменяются физико-химические показатели плодородия (увеличивается содержание гумуса, повышается обогащенность обменными основаниями, смещается рН в кислую сторону), что положительным образом сказывается на обеспеченности почв элементами питания [22].

В ходе исследования установлено, что минимальная обеспеченность черноземов нитратным азотом выявлена в почвах залежи косимой. Этот участок является смежным с лесной полосой и непосредственно примыкает к лесному массиву. Можно отметить равномерное распределение в пространстве количества доступного азота в течение всего вегетационного периода в пределах  $(6.0 \pm 0.6)$ – $(6.8 \pm 0.9)$  мг/кг. Исключением можно считать некоторое его уменьшение в начале вегетации на удалении 50 м от лесной полосы.

Результаты оценки пространственной неоднородности обеспеченности почв нитратным азотом показали, что по уровню обеспеченности нитратным азотом почв водораздельного участка прослежена некоторая дифференциация (рис. 2). Можно было выделить отдельные зоны с различным уровнем содержания доступного азота. В агрогенно-измененной почве четко выделялась зона с максимальной величиной содержания  $N-NO_3$ . Эта закономерность прослежена в течение всего летнего периода на расстоянии 75–100 м от полосы. Низкой обеспеченностью на начало вегетации характеризовалась почва залежи косимой и пашни, прилегающей к лесной полосе. Высоким уровнем обеспеченности характеризовалась центральная осевая часть чернозема под лесной полосой.

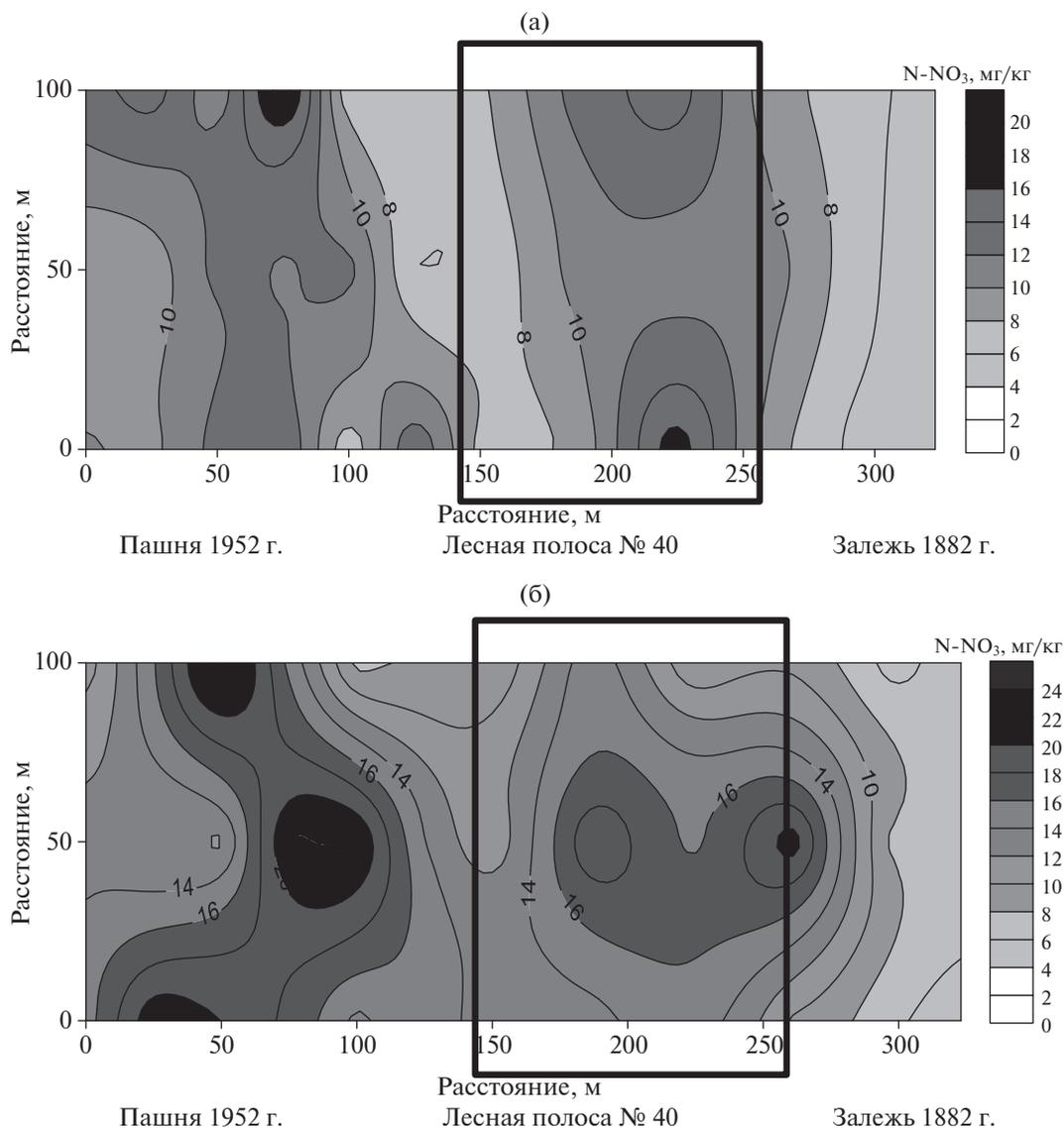
Динамика изменения содержания нитратного азота свидетельствовала о его увеличении от начала к концу вегетационного периода. Можно также отметить выравнивание его содержания в почвах пашни и лесной полосы. При этом в черноземах залежи косимой содержание нитратного азота было минимальным. На пашне максимум содержания нитратного азота отмечен на удалении 75–100 м от лесной полосы. В центре лесной полосы в черноземе этот показатель также был высоким и также, как и в начале вегетации, постепенно снижался по направлению к опушкам (табл. 1, рис. 2).

К концу вегетации, как уже было отмечено, в целом возросла обеспеченность нитратным азотом почв водораздельного участка (рис. 2). Низкий уровень обеспеченности был отмечен в почве залежи на максимальном удалении от лесной полосы, при приближении к ней обеспеченность нитратным азотом возрастала до повышенного и высокого уровней. В центре лесной полосы увеличилась площадь почв с высоким уровнем обеспеченности нитратным азотом. На западной опушке уровень обеспеченности нитратным азотом повысился с низких до средних и повышенных показателей. На пашне, на удалении от лесной полосы на 50–75 м появился ареал почв с очень высоким уровнем обеспеченности нитратным азотом. При дальнейшем удалении от лесной полосы уровень обеспеченности снижался до высоких и повышенных показателей.

Была изучена дифференциация показателей эффективного плодородия черноземов в зависимости от ландшафтной принадлежности. Дана оценка изменения содержания минеральных элементов на склоновом участке. В начале вегетационного периода минимальное содержание нитратного азота отмечено вблизи прибалочной лесной полосы –  $7.2 \pm 1.4$  мг/кг. При удалении от лесной полосы вверх по склону происходило постепенное увеличение этого показателя от  $11.3 \pm 2.4$  мг/кг на расстоянии 25 м от полосы до  $15.0 \pm 1.1$  мг/кг – на расстоянии 125 м (рис. 3, табл. 2).

К концу вегетационного периода отмечено небольшое увеличение содержания нитратного азота во всех точках опробования, только распределение данного показателя на различном удалении от лесной полосы стало более равномерным. Максимальные показатели отмечены вблизи лесной полосы ( $18.8 \pm 1.0$  мг/кг), далее произошло небольшое снижение содержания до  $15.7 \pm 1.9$  мг/кг в 75 м от лесной полосы и снова повышение до  $17.4 \pm 2.3$  мг/кг – в 125 м от полосы (рис. 2, табл. 2).

Данные обеспеченности нитратным азотом пашни на склоне различались в начале и конце вегетационного периода. В начале вегетационного периода пашня вблизи прибалочной лесной полосы № 72 характеризовалась низким содержанием нитратного азота. По мере удаления от лесной полосы уровень обеспеченности повышался сначала до среднего, далее – до повышенного и высокого на максимальном удалении от лесной полосы. К концу вегетационного периода картина изменилась. Высоким уровнем обеспеченности нитратным азотом характеризовалась пашня вблизи лесной полосы. При удалении от лесной полосы уровень обеспеченности снижался до



**Рис. 2.** Изоплета пространственного распределения содержания нитратного азота в лесной полосе № 40 и смежно расположенных с ней пашне и залежи (среднее за 2021–2022 гг.): (а) – начало вегетации, (б) – конец вегетации.

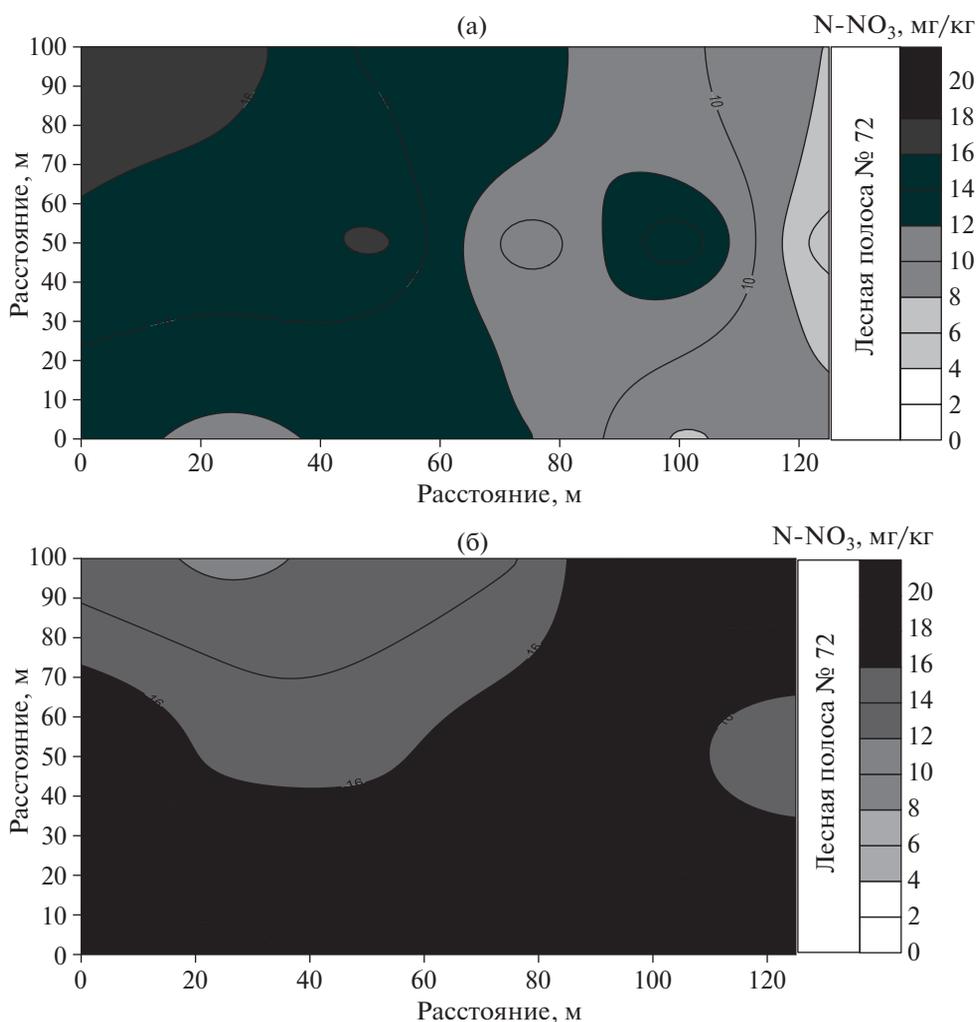
среднего и низкого на максимальном удалении от лесной полосы.

Отметим, что на склоновом участке, возле прибалочной лесной полосы № 72 количество нитратного азота в течение вегетации было соизмеримо с показателями на водораздельном участке вблизи лесной полосы № 40 (рис. 1, 2, табл. 1, 2).

**Подвижный фосфор.** Одним из основных показателей плодородия почв является наличие в ней подвижного фосфора. На подвижность фосфора в почвах оказывают влияние различные факторы, основные из которых – это различные условия увлажнения и кислотности почвы [23].

Изучение содержания доступного фосфора показало, что больше всего его накапливалось в черноземе пахотного участка на водоразделе (смежный участок с лесной полосой № 40). Отмечена четкая закономерность увеличения содержания фосфора по мере удаления от опушки лесной полосы. На прилегающей пашне содержание доступного фосфора было на минимальном уровне –  $3.5 \pm 0.2$  мг/100 г. На расстоянии 25 м от лесной полосы происходило резкое увеличение количества фосфатов до  $16.5 \pm 2.2$  мг/100 г. Максимальное содержание ( $23.6 \pm 1.0$  мг/100 г) было характерно для пашни на удалении 150 м от полосы.

Почвы лесного ценоза и смежного с ним залежного степного участка в этом отношении суще-



**Рис. 3.** Изоплета пространственного распределения содержания нитратного азота возле прибалочной лесной полосы № 72 (среднее за 2021–2022 гг.): (а) – начало вегетации, (б) – конец вегетации.

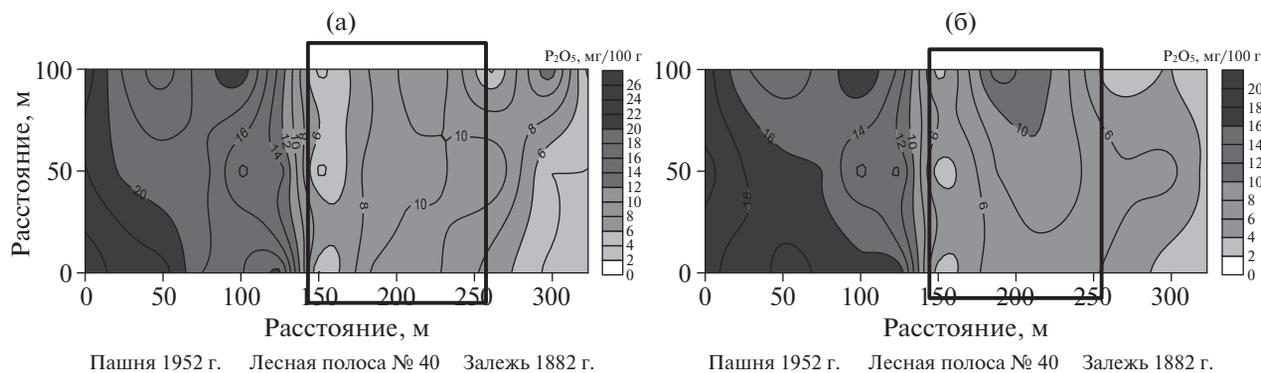
ственно уступали агрогенным почвам. При этом минимальные показатели в залежи отмечены на максимальном удалении от опушки лесного насаждения. Например, в начале вегетации на расстоянии 25 м от полосы количество  $P_2O_5$  было на

уровне  $7.1 \pm 3.3$  мг/100 г, на расстоянии 50 м – снижалось до  $3.6 \pm 0.2$  мг/100 г почвы.

Черноземы под лесным ценозом в течение летнего сезона характеризовались невысоким уровнем обеспеченности доступным фосфором. Мак-

**Таблица 2.** Показатели плодородия чернозема на пашне вверх по склону на различном удалении от прибалочной лесной полосы № 72 (среднее за 2021–2022 гг.)

Расстояние от ЛП № 72	N-NO <sub>3</sub> , мг/кг	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N-NO <sub>3</sub> , мг/кг	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
		мг/100 г			мг/100 г	
	начало вегетации			конец вегетации		
0 м	7.2 ± 1.4	10.1 ± 1.1	16.2 ± 3.6	17.7 ± 1.8	13.8 ± 1.8	24.8 ± 2.2
25 м	11.3 ± 2.4	7.6 ± 0.3	8.1 ± 1.0	18.8 ± 1.0	10.3 ± 0.3	15.6 ± 1.2
50 м	11.0 ± 1.3	7.3 ± 0.6	6.9 ± 0.3	15.8 ± 1.2	10.6 ± 0.4	13.0 ± 1.1
75 м	14.2 ± 1.2	7.7 ± 0.1	7.2 ± 0.7	15.7 ± 1.9	10.1 ± 0.5	14.4 ± 0.5
100 м	14.2 ± 1.6	7.4 ± 0.5	7.5 ± 0.7	15.8 ± 2.7	9.8 ± 0.4	15.8 ± 1.1
125 м	15.0 ± 1.1	6.9 ± 0.6	7.6 ± 0.8	17.4 ± 2.3	9.3 ± 0.1	14.0 ± 1.3



**Рис. 4.** Изоплета пространственного распределения содержания подвижного фосфора в лесной полосе № 40 и смежно расположенных с ней пашне и залежи (среднее за 2021–2022 гг.): (а) – начало вегетации, (б) – конец вегетации.

симальное его содержание, так же как и для нитратного азота, было характерно для середины лесной полосы –  $(9.0 \pm 0.9) - (10.5 \pm 0.7)$  мг/100 г. На опушечной части лесной полосы содержание фосфатов было существенно меньше: на западной опушке –  $(2.7 \pm 0.1) - (3.5 \pm 0.2)$  мг/100 г, на восточной –  $(4.8 \pm 1.1) - (7.6 \pm 2.5)$  мг/100 г.

Необходимо констатировать, что к концу вегетации происходило небольшое снижение содержания подвижного фосфора на водораздельном участке, но общая закономерность пространственного распределения содержания данного элемента оставалась без изменений (рис. 4).

Оценка пространственного изменения обеспеченности подвижным фосфором водораздельного участка в начале и в конце вегетации свидетельствовала об идентичном характере агрогенного влияния. Обеспеченность почвы пашни была повышенной и высокой на максимальном удалении от лесной полосы. Уровень обеспеченности лесной полосы характеризовался как средний, постепенно снижаясь до низкого на западной опушке и в залежи. Минимальные показатели были свойственны черноземам залежи косимой.

Исследование, проведенное на склоновом участке пашни возле прибалочной лесной полосы № 72, показало, что обеспеченность фосфором черноземов, подверженных эрозии, существенно меньше. При уровне обеспеченности на водоразделе в начале вегетации в пределах  $(16.5 \pm 2.2) - (23.6 \pm 1.0)$  мг/100 г в почвах склонов не превышали  $(6.9 \pm 0.6) - (7.7 \pm 0.1)$  мг/100 г почвы. Различия содержания фосфора в почвах пашни водораздела и склона таким образом составляли 2–3 кратную величину.

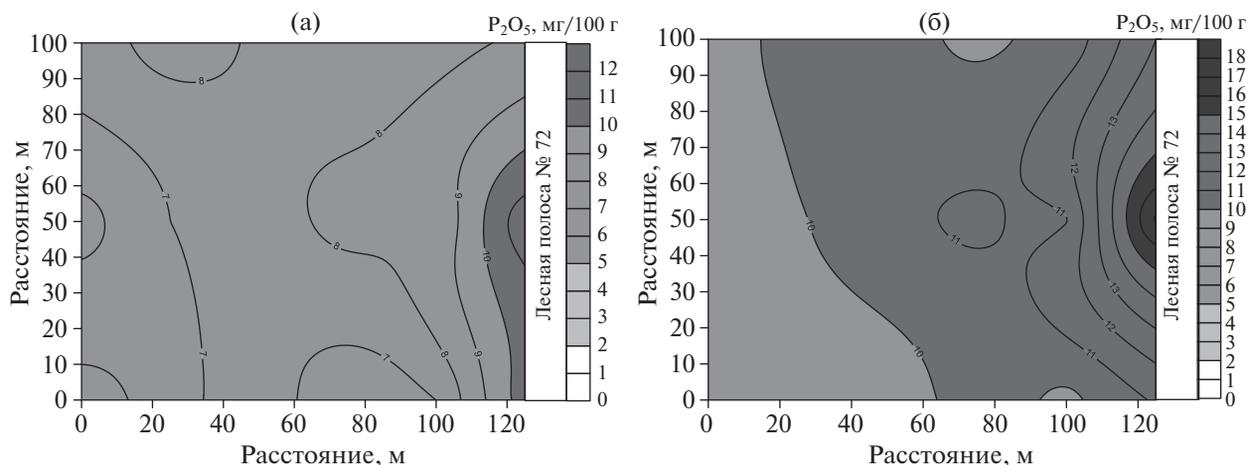
Максимум содержания подвижного фосфора в начале и конце вегетации отмечены вблизи лесной полосы. Более высокие показатели обеспе-

ченности почв в этом случае были обусловлены барьерными функциями лесной полосы. В приопушечной ее части при стоке талых и ливневых вод накапливалось значительное количество мелкозем, богатого элементами минерального питания. При удалении от лесной полосы № 72 происходило уменьшение содержания подвижного фосфора в почве (рис. 5, табл. 2). Вторая отличительная особенность склонового участка заключается в том, что к концу вегетации содержание подвижного фосфора возле лесной полосы № 72 увеличилось по сравнению с началом вегетации, в то время как на водораздельном участке – уменьшилось (рис. 4, 5).

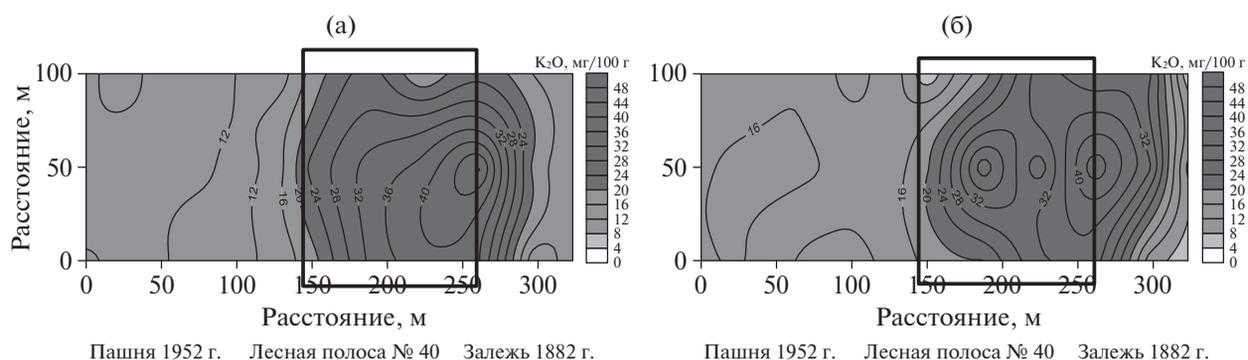
По уровню обеспеченности подвижным фосфором бóльшая часть пашни характеризовалась средним уровнем, лишь вблизи от лесной полосы – высоким уровнем. К концу вегетации обеспеченность подвижным фосфором возросла до повышенной на большей площади пашни. Вблизи лесной полосы уровень обеспеченности подвижным фосфором возрос до высокого. На максимальном удалении от лесной полосы уровень обеспеченности остался средним.

Таким образом, в течение вегетации на склоновом участке возле прибалочной лесной полосы № 72 количество подвижного фосфора уменьшалось при удалении от лесной полосы, в то время как на водораздельном участке – увеличивалось.

**Обменный калий.** Для роста и развития растений калий также необходим, как азот и фосфор. Растения легче переносят жаркие условия при нормальном калийном питании, что актуально для регионов с часто повторяющимися засухами [24]. На содержание обменного калия в почве сильно влияют такие факторы как влажность и кислотность почв. По мнению Петербургского [25], подщелачивание почвенной среды снижает



**Рис. 5.** Изоплеты пространственного распределения содержания подвижного фосфора на склоне возле прибалочной лесной полосы № 72 (среднее за 2021–2022 гг.): (а) – начало вегетации, (б) – конец вегетации.



**Рис. 6.** Изоплета пространственного распределения содержания обменного калия в лесной полосе № 40 и смежно расположенных с ней пашне и залежи, среднее за 2021–2022 гг.: (а) – начало вегетации, (б) – конец вегетации.

подвижность калия и, как следствие, доступность его растениями, подкисление оказывает обратное влияние.

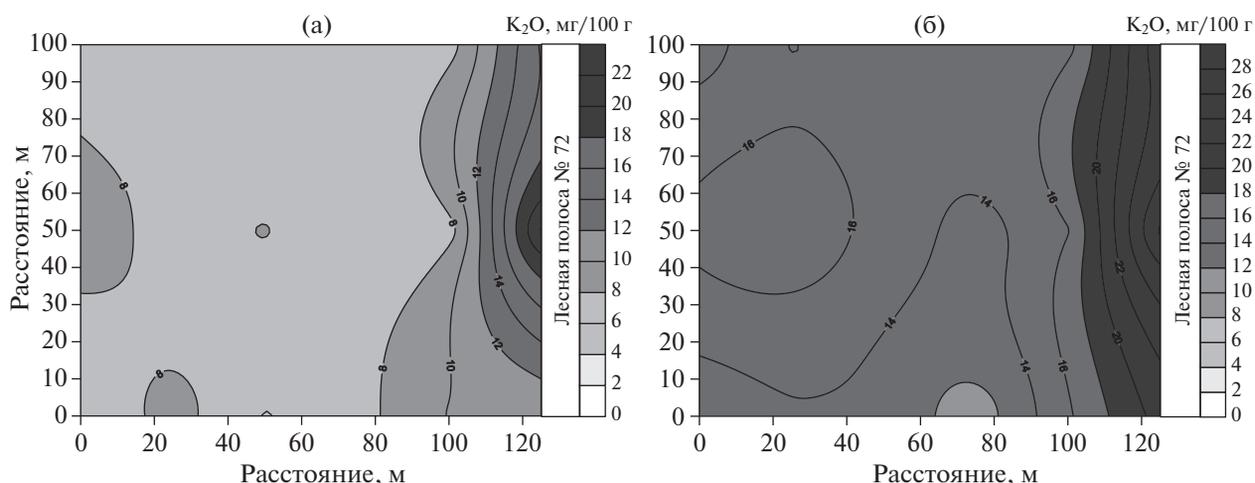
Максимальное содержание обменного калия на начало вегетации отмечено на водораздельном участке черноземов в лесной полосе –  $35.9 \pm 7.6$  мг/100 г, минимальное содержание выявлено в залежи ( $13.7 \pm 0.5$  мг/100 г) и на большей части пашни – ( $11.3 \pm 0.3$ ) – ( $13.1 \pm 0.3$ ) мг/100 г, примыкающей к лесной полосе (рис. 6, табл. 1). Анализируя содержание обменного калия на пашне, можно отметить его увеличение при удалении от лесной полосы. Максимальное содержание обменного калия выявлено на пашне на расстоянии 100–150 м от лесной полосы ( $15.0 \pm 1.8$  мг/100 г).

К концу вегетации происходило небольшое увеличение содержания обменного калия на водораздельном участке, но общая картина пространственного распределения данного показателя осталась неизменной. Максимум содержания

обменного калия также был характерен для почвы лесной полосы ( $36.4 \pm 5.5$  мг/100 г), минимум – для косимой залежи ( $5.8 \pm 0.6$  мг/100 г) (рис. 5, табл. 1).

По уровню обеспеченности обменным калием водораздельный участок характеризовался очень высоким содержанием (лесная полоса, прилегающая часть залежи) и высоким (западная опушка, пашня и залежь на максимальном удалении от лесной полосы). Данные на начало и конец вегетации на водораздельном участке были аналогичными (рис. 6).

Рассматривая участок пашни на склоне около прибалочной лесной полосы № 72, можно отметить более низкое содержание обменного калия в течение вегетации по сравнению с водораздельным участком. Максимальное содержание обменного калия выявлено вблизи лесной полосы ( $16.2 \pm 3.6$  мг/100 г в начале вегетации и  $24.8 \pm 2.2$  мг/100 г – в конце). При удалении от лесной полосы № 72 происходило уменьшение содержа-



**Рис. 7.** Изоплеты пространственного распределения содержания обменного калия на склоне возле прибалочной лесной полосы № 72 (среднее за 2021–2022 гг.): (а) – начало вегетации; (б) – конец вегетации.

ния обменного калия в почве (рис. 7, табл. 2). Минимальное содержание обменного калия и в начале, и в конце вегетационного периода выявлено в почве пашни в 50 м от лесной полосы № 72 ( $6.9 \pm 0.3$  и  $13.0 \pm 1.1$  мг/100 г соответственно).

Очень высоким уровнем обеспеченности обменным калием в начале вегетации характеризовалась пашня вблизи лесной полосы. По мере удаления от нее уровень обеспеченности снижался до высокого, среднего и низкого. К концу вегетации площадь пашни вдоль лесной полосы с очень высоким уровнем обеспеченности обменным калием возросла. Уровень обеспеченности остальной площади пашни при удалении от лесной полосы характеризовался как высокий.

Более высокие показатели обеспеченности почв лесных ценозов доступными формами калия обусловлены многолетним влиянием богатого зольными элементами листового опада. Как показали наши исследования, запасы подстилки под старовозрастной лесной полосой составляли порядка 20.0–25.0 т/га, в то время как степной ценоз и культуры на пашне формировали существенно меньшую остаточную наземную биомассу, не превышавшую соответственно 3.0–4.5 и 6.0–8.0 т/га. При этом, как указано в работе [21], зольность лесной подстилки в 8 раз превышает степную. Еще одним моментом, способствующим повышению обеспеченности почв лесных ценозов подвижным калием, могло быть смещение реакции среды в кислую сторону. Это подтвердили наши исследования [22].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, определение показателей эффективного плодородия в почвах под влиянием различного характера антропогенного воздействия, использования угодий и лесных полос на различных элементах рельефа (водораздел и склон) позволило выявить определенную закономерность. Распашка черноземов активизировала биологические почвенные процессы, способствующие увеличению обеспеченности почв нитратным азотом. Не установлено существенных различий влияния ландшафтной принадлежности пахотного участка на количество доступного азота. Обеспеченность почв нитратным азотом в течение вегетации на водораздельном и склоновом участках была на одном уровне.

В почвах залежи величина содержания минеральных элементов в течение всего периода наблюдений характеризовалась низким уровнем обеспеченности.

Наибольшей обеспеченностью подвижным фосфором и обменным калием характеризовались почвы водораздельного участка. В зоне влияния прибалочной лесной полосы их доступность растениям была заметно меньше.

Количество подвижного фосфора и обменного калия на склоновом участке возле лесной полосы № 72 уменьшалось при удалении от лесной полосы, в то время как на водораздельном участке — увеличивалось. Количество нитратного азота и на склоновом, и на водораздельном участках увеличивалось при удалении от лесной полосы.

Анализируя данные изменения показателей эффективного плодородия во времени, пришли к выводу, что на водораздельном участке к концу

вегетации за 2 года исследования содержание нитратного азота и обменного калия увеличивалось, подвижного фосфора — уменьшалось. На склоновом участке к концу вегетации происходило увеличение всех исследованных показателей плодородия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рудаков П.Б.* Роль защитных лесных полос в сохранении плодородия почв Республики Башкортостан // Современные проблемы агропромышленного комплекса. Сб. научн. тр. 71-й Международ. научн.-практ. конф. 2018. С. 124–126.
2. *Куулар Ч.И., Сорокина О.А.* Изменение показателей плодородия почв под воздействием искусственных лесных насаждений в Ширинской степи // Вестн. КрасГАУ. 2014. № 5 (92). С. 73–77.
3. *Ардаширов А.И., Хаматдинов А.Р.* Полезащитные лесные полосы и плодородие почв // Студент и аграрная наука. Мат-лы X Всерос. студ. научн. конф. 2016. С. 11–14.
4. *Белолубцев А.И., Осипов В.Н., Савоськина О.А., Манишкин С.Г., Копылов Е.В.* Действие противоэрозионных обработок на изменение показателей плодородия почвы // Докл. ТСХА. 2004. С. 89–94.
5. *Проездов П.Н., Маштаков Д.А.* Агролесомелиорация. (Изд-е 2-е перераб., доп.). Монография. Саратов: Амирит, 2016. 472 с.
6. *Каргин В.И., Брагин Г.Г., Салкова М.В.* Изменение показателей плодородия почв Республики Мордовия при их длительном сельскохозяйственном использовании // Перспективы и проблемы размещения отходов производства и потребления в агроэкосистемах. Мат-лы Международ. научн.-практ. конф. Н. Новгород: Нижегород. ГСХА, 2014. С. 164–167.
7. *Антоненко Е.В., Сибилева Т.А.* Динамика изменения показателей плодородия почв Центральной и Северной сельскохозяйственных зон Амурской области // Достиж. науки и техн. АПК. 2016. Т. 30. № 8. С. 17–21.
8. *Обезинская Э.В., Либрик А.А., Крижановская Е.И.* Влияние полезащитных лесных полос на основные показатели плодородия почв Павлодарской степи // Эколого-экономическая эффективность природопользования на современном этапе развития Западно-Сибирского региона. 2017. С. 97–99.
9. *Громовик А.И., Королев В.А., Йонко О.А.* Влияние полезащитных лесных полос на основные показатели плодородия почв Каменной Степи // Вестн. ВоронежГУ. Сер.: Химия. Биология. Фармация. 2013. № 1. С. 105–114.
10. *Троц В.Б.* Агроэкологическое влияние полезащитных лесных полос // Изв. Оренбург. ГАУ. 2016. № 4. С. 189–192.
11. *Васильченко Н.И., Звягин Г.А., Петрова А.А.* Влияние полезащитных лесополос на основные показатели плодородия черноземов южных Северного Казахстана // Вестн. Рязан. гос. агротехнол. ун-та им. П.А. Костычева. 2020. № 1 (45). С. 9–15.
12. *Троц В.Б.* Влияние полезащитных лесных полос на состояние и продуктивность агроландшафта // Аграрн. Россия. 2017. № 11. С. 19–22.
13. *Подлесных И.В., Зарудная Т.Я.* Изменения плодородия почвы под влиянием лесной полосы // Защитное лесоразведение, мелиорация земель, проблемы агроэкологии и земледелия в Российской Федерации. Мат-лы Международ. научн.-практ. конф., посвящ. 85-летию создания ВНИИ агролесомелиорат. ин-та. 2016. С. 490–494.
14. *Хусаинов А.Т., Сейдалина К.Х.* Содержание нитратного азота в черноземных почвах Северного Казахстана // Вестн. Алтай. ГАУ. 2009. № 3 (53). С. 27–30.
15. *Рабданов Г.Г., Рабданов Р.Г.* Влияние уровня залегания грунтовых вод на основные показатели плодородия светло-каштановых почв // Агрохимия. 2018. № 4. С. 27–35.
16. *Желтякова М.Г.* Влияние эрозионных процессов на плодородие пахотных светло-серых лесных почв // Научн. журн. мол. ученых. 2020. № 1 (18). С. 16–20.
17. *Филиппова Т.Е., Соколов Ю.П., Рабинович Г.Ю., Кузьмин Е.А., Корнеева О.В., Шахпаронян Л.А.* Влияние рельефа на пространственное изменение показателей плодородия почв мелиорированного конечно-моренного агроландшафта // Почвоведение. 2006. № 6. С. 741–750.
18. *Тарасов С.А.* Лесные полосы как фактор повышения эффективного плодородия почв на склонах ЦЧР // Плодородие почв — основа продовольственной безопасности государства. Мат-лы VI съезда Белорус. общ-ва почвоведов и агрохимиков. 2022. С. 280–284.
19. *Вавин В.С., Рымарь В.Т., Ахтямов А.Г., Свиридов Л.Т.* Создание долговечных защитных лесных насаждений в условиях юго-востока ЦЧП. Воронеж, 2007. 240 с.
20. *Мильков Ф.Н., Нестеров А.И., Петров Н.Г., Гончаров М.В.* Каменная степь (Опыт ландшафтно-типологической характеристики). Воронеж: Изд-во ВГУ, 1971. 176 с.
21. *Брук М.С.* Изменение обыкновенных черноземов под влиянием распашки лесных полос // Почвоведение. 1977. № 1. С. 31–41.
22. *Чеве́рдин Ю.И.* Закономерности изменения и состояние почв Докучаевского стационара в современных условиях // Актуальные вопросы развития идей В.В. Докучаева в XXI веке. Развитие аграрной науки на современном этапе: мат-лы Международ. научн.-практ. конф. и Всерос. школы мол. ученых и специалистов, посвящ. 130-летию организации "Особой экспедиции Лесного департамента по испытанию и учету различных способов и приемов лесного и водного хозяйства в степях южной Рос-

- сии”, 14–16 июня 2022 г. Ч. 1. М.: Изд-во “РИТМ: изд-во, технол., медицина”, 2022. С. 45–49.
23. Шконде Э.И. Агрохимические свойства и плодородие черноземов европейской части СССР // Агрохимическая характеристика основных типов почв СССР. М.: Наука, 1974. С. 203–260.
24. Кореньков Д.А. Минеральные удобрения при интенсивных технологиях. М.: Росагропромиздат, 1990. 192 с.
25. Петербургский А.В. Усвоение растениями калия и других обменно-поглощенных почвой катионов в свете учения К.К. Гедройца // Почвоведение. 1973. № 6. С. 50–59.

## Changes in the Indicators of Effective Soil Fertility of the Stone Steppe under the Influence of Forest Strips of Various Landscape Accessories

Yu. I. Cheverdin<sup>a,#</sup>, V. A. Besspalov<sup>a</sup>, and T. V. Titova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Voronezh Federal Agricultural Scientific Centre named after V.V. Dokuchaev

POS 2 division of the Institute Dokuchaev, quart. 5, d. 81, Voronezh region, Talovskiy district 397463, Russia

<sup>#</sup>E-mail: cheverdin62@mail.ru

Within the framework of the program on the subject of the state task in 2021–2022, studies were conducted on changes in the indicators of effective fertility in space and time under the influence of forest strips of various landscape accessories (forest strip No. 40 on the watershed, forest strip No. 72 on the slope). All works were performed in the Voronezh FASC named after V.V. Dokuchaev. It was found that the soils of the watershed area were characterized by the greatest availability of mobile phosphorus and exchangeable potassium. The provision of soils with nitrate nitrogen during the growing season in the watershed and slope areas was at the same level. The watershed area was characterized by a decrease in the amount of mineral elements on the soils of the deposit and the edges of the forest strip No. 40. As for the forest strip itself, the maximum indicators were noted in the center of the forest strip, gradually decreasing in the direction of the edges. Considering the indicators of fertility of arable land, it was noted that they increase at a distance from the forest strip, their maximum was detected at a distance of 75–150 m from the forest strip. On the arable land adjacent to the Baltic forest strip No. 72, an increase in the content of mobile phosphorus and exchangeable potassium was noted when approaching the forest strip. The content of nitrate nitrogen, on the contrary, decreased downhill, reaching a minimum near the forest strip. It is proved that by the end of the growing season, the content of nitrate nitrogen and exchangeable potassium increased in the watershed, and the content of mobile phosphorus decreased. At the slope site, by the end of the growing season, there was an increase in all the studied fertility indicators.

*Keywords:* forest strip, watershed, slope, nitrate nitrogen, mobile phosphorus, exchangeable potassium, fertility.

УДК 631.452:631.445.41:631.81:631.582(470.32)

## ПЛОДОРОДИЕ ВЫЩЕЛОЧЕННОГО ЧЕРНОЗЕМА КАК РЕЗУЛЬТАТ 85-ЛЕТНЕГО ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ В ЗЕРНОСВЕКЛОВИЧНОМ СЕВООБОРОТЕ В УСЛОВИЯХ ЦЧР

© 2023 г. О. А. Минакова<sup>1,\*</sup>, Л. В. Александрова<sup>1</sup>, Т. Н. Подвигина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара им. А.Л. Мазлумова  
396030 Воронежская обл., Рамонский р-н, пос. ВНИИСС, 86, Россия

\*E-mail: olalmin2@rambler.ru

Поступила в редакцию 26.02.2023 г.

После доработки 28.03.2023 г.

Принята к публикации 15.05.2023 г.

Использование удобрений в зерносвекловичном севообороте в течение 85-ти лет в значительной мере изменяло агрохимические свойства чернозема выщелоченного, в наибольшей степени выразившиеся в оптимизации фосфатного режима почвы и менее всего – калийного. Удобренность в большей степени изменяла азотный режим и физико-химические свойства почвы в слое 20–40 см, чем 0–20 см. Установлено, что в почве под посевами зерновых культур содержание  $P_2O_5$  было больше, чем под посевами сахарной свеклы, а  $K_2O$  и величина  $pH_{KCl}$  – меньше. Наибольшие изменения агрохимических свойств почвы под посевами сахарной свеклы были отмечено при использовании N190P190K190, зерновых – при последствии N135P135K135 + навоз 25 т/га.

*Ключевые слова:* стационарный опыт, удобрения, сахарная свекла, зерновые, плодородие, элементы питания.

**DOI:** 10.31857/S0002188123080070, **EDN:** ZDWCJC

### ВВЕДЕНИЕ

Плодородие почвы – ее специфическое свойство, характеризующее накопленные ресурсы вещества, энергии и информации, которые используются растениями в биогеоценозе [1].

Внесение удобрений – один из основных регулируемых факторов, используемых для целенаправленного управления ростом и развитием растений с целью создания высокого урожая хорошего качества [2] и управления почвенным плодородием. Только в стационарных опытах с удобрениями на основе накопления и обобщения экспериментального материала возможна объективная оценка плодородия (эколого-агрохимическая, почвенно-экологическая) и других показателей агроэкосистемы (эколого-земледельческая оценка) [3].

Длительное систематическое применение удобрений в оптимальном для питания растений количестве обеспечивает улучшение плодородия [4]: как повышение содержания гумуса, оптимизацию обменной и гидролитической кислотности, создание положительного баланса и повышение содержания подвижных форм NPK [5–8]. Под влиянием длительного применения удобрений происходит процесс перестройки калийного

фонда, направленность которого определяет генетические свойства почвы, а количественные изменения – дозы и длительность внесения удобрений [7].

Отечественное свекловодство практически полностью обеспечило независимость страны от поставок импортного сырья [9]. Особенностью возделывания сахарной свеклы является применение значительных доз минеральных удобрений под культуру: например, в 2016–2019 гг. в сумме вносили 274–308 кг NPK/га [10], а также проявлением значительного их последствие на урожайность зерновых и трав, возделываемых в свекловичных севооборотах [11–13].

Цель работы – изучение параметров плодородия выщелоченного чернозема как результата 85-летнего применения удобрений в зерносвекловичном севообороте в условиях ЦЧР.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в 2018–2022 гг. в длительном стационарном опыте по внесению удобрений, заложенном в 1936 г. (пос. Рамонь, Воронежская обл.). Объектом исследования являлась почва стационарного опыта – чернозем

**Таблица 1.** Погодные условия вегетационных периодов (2018–2022 гг.)

Годы					Среднее за 2018–2022 гг.	Среднее многолетнее (2012–2022 гг.)
2018	2019	2020	2021	2022		
Количество осадков, мм						
231.6	187.5	182.3	298.3	456.8	270.7	382.1
Температура, °С						
17.2	16.3	16.4	16.7	15.5	16.4	15.9
ГТК						
0.8	0.9	0.6	1.0	1.7	1.0	1.27

выщелоченный малогумусный среднemosный тяжелосуглинистый, а также основная продукция сахарной свеклы (корнеплоды), озимой пшеницы, овса и ячменя (зерно), зеленая масса травосмеси горох + овес и клевера. Удобрения применяли в 9-польном зернопаропропашном севообороте со следующим чередованием культур: черный пар–озимая пшеница–сахарная свекла–ячмень с подсевом клевера – клевер 1-го года использования–озимая пшеница–сахарная свекла–однолетние травы (травосмесь горох + овес)–овес. Схема опыта: 1 – контроль без удобрений, 2 – система удобрения I – N45P45K45 + навоз 25 т/га (в сумме за ротацию с учетом навоза вносили 607.5 кг NPK, уровень удобренности пашни – 67.5 кг NPK), 3 – система удобрения II – N90P90K90 навоз + 25 т/га (877.5 кг и 97.5 кг), 4 – система удобрения III – N135P135K135 + навоз 25 т/га (1147.5 кг и 127.5 кг), 5 – система удобрения IV – N120P120K120 + навоз 50 т/га (1395 кг и 155 кг), 6 – система удобрения V – N190P190K190 (1140 кг и 126.7 кг). В качестве минеральных удобрений использовали НАФК (16 : 16 : 16), которую вносили только под сахарную свеклу (2 раза за ротацию) осенью перед основной обработкой почвы (отвальной вспашкой), навоз – один раз за ротацию в пару, прямое действие навоза испытывала озимая пшеница в паровом звене. Остальные культуры использовали последствие удобрений.

Повторность опыта трехкратная, размещение вариантов систематическое. Площадь опытной делянки и учетной составляла соответственно 133.7 м<sup>2</sup> и 16.2 м<sup>2</sup> (зерновые и травы), 10.8 м<sup>2</sup> – сахарная свекла. Возделывали районированные гибриды сахарной свеклы отечественной селекции (PMS 120, PMS 121, PMS 127), сорта зерновых культур отечественной и белорусской селекции: озимой пшеницы – Безенчукская 380, Скипетр, ячменя – Атаман, Таловский 9, овса – Лев, Золотой дождь, клевера – Трубетчинский местный и Дымковский, горох в травосмеси – сортов АЗМК 99, Риф 12, Топаз.

Почвенные образцы отбирали с глубины 0–20, 20–40, 40–60 см в 3-й декаде мая согласно ГОСТ P58595-2019. Агрохимические анализы произво-

дили в ГЦАС “Воронежский” и лаборатории агрохимии ВНИИСС им. А.Л. Мазлумова. В свежих образцах определяли содержание нитратного азота по Грандваль–Ляжу, аммонийного азота – по ГОСТ 26489-85, в сухих образцах – содержание подвижного P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и обменного K<sub>2</sub>O по Чирикову (ГОСТ 26213-91) и рН<sub>KCl</sub> (ГОСТ 26490-85). Статистическую обработку данных проводили согласно работе (1985) с помощью ПК, регрессионный анализ – программы Excel 2010.

Увлажнение теплых периодов 2018–2022 гг. в Рамонском р-не Воронежской обл. за годы исследования в значительной степени различалось, разница составила 5.2–116 мм (2.85–151%) (табл. 1). Самое большое количество осадков отмечено в 2022 г. (456.8 мм), минимальное – в 2020 г. (182.3 мм).

Самым теплым период с мая по октябрь был в 2018 г. (17.2°С), холодным – в 2022 г. (15.5°С), разницы составила 1.7°С. Гидротермический коэффициент в 2018–2021 гг. свидетельствовал о засушливых условиях, в 2022 г. – об избыточном увлажнении, но в среднем за 5 лет увлажнение также было недостаточным, что подтверждалось суммой осадков (270.7 мм по сравнению с 382.1 мм – среднемноголетней нормой). Выше-сказанное свидетельствует, что теплые периоды последнего 5-летия можно охарактеризовать как засушливые с повышенными температурами.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что минимальное содержание N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> во всех слоях почвы отмечено в варианте N45P45K45 + навоз 25 т/га, максимальное – в варианте N190P190K190 в слое 0–20 см и в варианте N90P90K90 + навоз 25 т/га в слое 40–60 см. Достоверное повышение количества нитратного азота в удобренных вариантах отмечали в слоях 20–40 и 40–60 см на 32.0–40.0 и 15.1–103% (табл. 2) соответственно, тогда как в слое 0–20 см не было статистически доказанного изменения, только в вариантах N190P190K190 и N90P90K90 + навоз

25 т/га была выявлена тенденция к увеличению его содержания.

Содержание N-NO<sub>3</sub> повышалось (кроме контроля, где отмечено снижение на 10.7%), в вариантах с применением удобрений менялось в диапазоне 6.01–39.7%, что свидетельствовало о перемещении элемента из верхнего слоя в средний, наиболее высоким оно было в варианте N90P90K90 + навоз 25 т/га, низким – в варианте N45P45K45 + навоз 25 т/га. К слою 40–60 см относительно слоя 20–40 см наблюдали уменьшение градиента на 26.1–95.8%, более всего – в контроле и в варианте N45P45K45 + навоз 25 т/га, что показало большее обогащение слоя 20–40 см. Минимальное количество нитратного азота выявлено в варианте N190P190K190, что свидетельствовало о более равномерном его распределении. По классификации агрохимической обеспеченности данное содержание в слое 0–40 см позволяет отнести почву к средней обеспеченности (кроме варианта N45P45K45 + навоз 25 т/га – с низкой обеспеченностью).

В слое 0–60 см минимум содержания N-NO<sub>3</sub> также был выявлен в варианте N45P45K45 + навоз 25 т/га, максимум – в варианте N90P90K90 + навоз 25 т/га, удобрения повышали содержание элемента относительно контроля на 26.4–57.1%. Как система удобрения N45P45K45 + навоз 25 т/га относительно контроля, так и система N135P135K135 + навоз 25 т/га относительно варианта N90P90K90 + навоз 25 т/га снижали содержание N-NO<sub>3</sub> на 16.5 и 19.6% соответственно, дозы N90P90K90 + навоз 25 т/га и N190P190K190 увеличивали содержание нитратного азота на 88.2 и 9.40% соответственно, что свидетельствовало о неравномерном повышении содержания данной формы азота под влиянием удобрённости. Возможно это происходило под влиянием других параметров плодородия чернозема и миграции элемента.

От слоя 0–20 см к 20–40 см происходило увеличение нитрификационной способности почвы как в контроле (на 20.4%) (табл. 3), так и в вариантах с удобрениями (на 9.54–19.9%), что свидетельствовало об обогащении слоя 20–40 см растительными остатками – материалом для нитрификации и активации деятельности бактерий-нитрификаторов. Вследствие того, что в слое 0–20 см вариантов с удобрениями отмечали содержание данной формы азота на 39.3–65.0% больше, чем в контроле, а в слое 20–40 см – на 12.5–56.9%, то в этих слоях выявлено уменьшение разницы величины нитрификации по слоям. К слою 40–60 см наблюдали снижение нитрификации на 9.91–36.5% по сравнению с 20–40 см, но относительно контроля она оставалась повышенной на 26.9–44.8%.

В слое 0–60 см удобрения значительно (на 25.7–62.4%) увеличивали нитрификационную

**Таблица 2.** Содержание N-NO<sub>3</sub> в почве под посевом сахарной свеклы, мг/100 г почвы

Слой почвы, см			
0–20	20–40	40–60	Среднее в слое 0–60 см
Без удобрений			
1.12	1.00	0.62	0.91
N45P45K45 + навоз 25 т/га			
0.86	0.94	0.48	0.76
N90P90K90 + навоз 25 т/га			
1.26	1.76	1.26	1.43
N135P135K135 + навоз 25 т/га			
1.13	1.32	0.99	1.15
N120P120K120 + навоз 50 т/га			
1.14	1.37	1.0	1.17
N190P190K190			
1.32	1.40	1.11	1.28
HCP <sub>05</sub>			
–	0.07	0.05	0.12

способность относительно контроля, более всего – в варианте N190P190K190, также высокие показатели процесса отмечали в вариантах N90P90K90 + навоз 25 т/га и N120P120K120 + навоз 50 т/га.

В слое 0–20 см удобрённых вариантов содержание подвижного P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> соответствовало повышенной агрохимической обеспеченности (кроме варианта с минимальной дозой N45P45K45 + навоз 25 т/га). Длительное применение удобрений в течение более 80 лет обеспечивало увеличение показателя на 47.4–152% (табл. 3), максимально – при N190P190K190, минимально – в варианте N45P45K45 + навоз 25 т/га, т.е. отмечена значительная зависимость этого показателя от уровня удобрённости, что подтверждено данными корреляционного анализа. В слое 0–60 см повышение составило 38.0–132%, более всего – при внесении N135P135K135 + навоз 25 т/га и N190P190K190.

В слое 20–40 см удобрения повышали содержание P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> относительно контроля на 28.3–133, в слое 40–60 см – на 64.3–150%. Вариант N135P135K135 + навоз 25 т/га обеспечивал наивысшие показатели, вариант N45P45K45 + навоз 25 т/га – минимальные. Сравнение концентрации элемента по слоям позволило заключить о его накоплении в слое 0–20 см и постепенном снижении к слоям 20–40 и 40–60 см. Наибольший градиент уменьшения содержания от верхнего к нижнему слою отмечен в контроле и в варианте N190P190K190 (22.3 и 43.0% соответственно), наименьший – в варианте N45P45K45 +

**Таблица 3.** Нитрификационная способность почвы под посевами сахарной свеклы и содержание в ней подвижных фосфора и калия, мг/100 г почвы

Слой почвы, см			
0–20	20–40	40–60	Среднее в слое 0–60 см
Нитрификационная способность, мг/100 г почвы			
Без удобрений			
2.06	2.48	2.23	2.26
N45P45K45 + навоз 25 т/га			
2.87	2.79	2.89	2.87
N90P90K90 + навоз 25 т/га			
3.36	4.02	3.16	3.51
N135P135K135 + навоз 25 т/га			
3.04	3.33	3.00	3.12
N120P120K120 + навоз 50 т/га			
3.40	3.89	3.23	3.51
N190P190K190			
3.72	4.46	2.83	3.67
HCP <sub>05</sub>			
0.14	0.17	0.14	0.13
Подвижный P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/100 г почвы			
Без удобрений			
6.07	6.00	4.96	5.68
N45P45K45 + навоз 25 т/га			
8.95	7.70	8.15	8.27
N90P90K90 + навоз 25 т/га			
12.1	11.9	10.4	11.5
N135P135K135 + навоз 25 т/га			
13.8	14.0	12.4	13.4
N120P120K120 + навоз 50 т/га			
10.4	10.6	8.80	9.93
N190P190K190			
15.3	13.7	10.7	13.2
HCP <sub>05</sub>			
0.5	0.5	0.5	0.5
Подвижный K <sub>2</sub> O, мг/100 г почвы			
Без удобрений			
17.5	16.9	14.0	16.1
N45P45K45 + навоз 25 т/га			
19.5	15.0	16.2	16.9
N90P90K90 + навоз 25 т/га			
19.8	18.7	14.3	17.6
N135P135K135 + навоз 25 т/га			
19.2	15.6	15.8	16.9
N120P120K120 + навоз 50 т/га			
23.9	20.8	16.6	20.4
N190P190K190			
19.4	20.6	15.2	18.4
HCP <sub>05</sub>			
1.0	1.0	0.7	0.9

+ навоз 25 т/га (9.28%), возможно, вследствие не-высокого поступления P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и значительного потребления при минимальной дозе удобрения.

Увеличение дозы удобрений от контроля к максимальной дозе в слое 0–60 см повысило содержание P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> в растениях относительно контроля на 45.6, 39.1, 16.5%, снизило на 25.9% и вновь повысило на 32.9%, что свидетельствовало о снижении его накопления с увеличением дозы, а система N120P120K120 + навоз 50 т/га несколько снижала его накопление, возможно, вследствие перевода элемента в неизвлекаемое слабой кислотой состояние.

Влияние удобренности на калийный режим проявилось в увеличении содержания K<sub>2</sub>O относительно контроля в слое 0–20 см на 11.4–36.6%, в слое 20–40 см – на 10.7–23.1%, 40–60 см – на 8.57–18.6%, более всего во всех слоях увеличивала его содержание система N120P120K120 + навоз 50 т/га, в слое 20–40 см – N90P90K90 + навоз 25 т/га и N190P190K190, 0–20 и 40–60 см – N135P135K135 + + навоз 25 т/га (табл. 3). Применение удобрений создавало высокий уровень обеспеченности элементом. Градиент концентрации K<sub>2</sub>O с глубиной в основном в большинстве вариантов уменьшался, кроме варианта N190P190K190, где в слое 20–40 см было отмечено относительно слоя 40–60 см повышение содержания калия на 35.5%, в варианте N45P45K45 + навоз 25 т/га – на 7.41% в слое 40–60 см (относительно 20–40 см), свидетельствовавшее о накоплении элемента.

Среднее содержание K<sub>2</sub>O в слое 0–60 см в удобренных вариантах повысилось относительно неудо-бренного на 4.97–26.7%, наибольший его рост отмечен в вариантах N120P120K120 + навоз 50 т/га и N190P190K190. Увеличение удобренности почвы от контроля к высоким дозам в основном постепенно повышало показатель, кроме варианта N120P120K120 + навоз 50 т/га, где было отмечено значительное, на 20.7% повышение содержания калия относительно более низкой дозы (N135P135K135 + навоз 25 т/га), в варианте N190P190K190 впоследствии отмечали его снижение на 9.8%, свидетельствовавшее об ослаблении накопления элемента.

Удобренность изменила величину гидролитической кислотности в слое 0–20 см на 0.33–1.42 ммоль-экв (на 9.40–40.5%), в слое 20–40 см – на 0.75–1.55 ммоль-экв (на 21.9–45.5%) относительно контроля (табл. 4). Максимальная величина H<sub>T</sub> выявлена в варианте N190P190K190, минимальная – в контроле, из удобренных вариантов – N45P45K45 + навоз 25 т/га. С глубиной показатель повышался в вариантах N45P45K45 + навоз 25 т/га, N90P90K90 + навоз 25 т/га, N135P135K135 + + навоз 25 т/га на 0.28–0.35 ммоль-экв/100 г почвы.

Почва большинства вариантов с удобрениями в слое 0–20 см относилась к слабокислой, а в ва-

**Таблица 4.** Формы кислотности в почве под посевами сахарной свеклы в 10-й ротации

Слой, см	$H_r$ , ммоль-экв/100 г почвы	$pH_{KCl}$ , ед.	Слой, см	$H_r$ , ммоль-экв/100 г почвы	$pH_{KCl}$ , ед.
Без удобрений			N135P135K135 + навоз 25 т/га		
0–20	3.51	5.92	0–20	4.18	5.42
20–40	3.41	6.05	20–40	4.53	5.37
N45P45K45 + навоз 25 т/га			N120P120K120 + навоз 50 т/га		
0–20	3.84	5.75	0–20	4.51	5.44
20–40	4.16	5.60	20–40	4.28	5.48
N90P90K90 + навоз 25 т/га			N190P190K190		
0–20	4.10	5.43	0–20	4.93	5.31
20–40	4.38	5.34	20–40	4.96	5.29
<i>HCP<sub>05</sub></i>					
			0–20	0.22	0.28
			20–40	0.20	0.29

рианте N45P45K45 + навоз 25 т/га и в контроле – близкой к нейтральной. Длительное систематическое применение удобрений привело к снижению показателя на 0.17–0.61 ед. в слое 0–20 см и на 0.45–0.76 ед. – в слое 20–40 см, что свидетельствовало о более значительном изменении этого показателя в нижнем слое. Увеличение уровня удобрений неравномерно повышало величину  $pH_{KCl}$  как в верхнем, так и нижнем слое, более всего при дозах N45P45K45 + навоз 25 т/га и N90P90K90 + навоз 25 т/га (на 0.17–0.32 и 0.26–0.45 ед. соответственно), в слое 20–40 см – (в вариантах N120P120K120 + навоз 50 т/га и N190P190K190 только – на 0.11–0.19 ед., что свидетельствовало о более выраженном влиянии невысоких доз удобрений, возможно вследствие низкой буферности почвы [14]. Самая низкая величина  $pH_{KCl}$  ( $KCl$  - нижний индекс) была отмечена в варианте N190P190K190, самая высокая – в контроле. В слое 0–40 см относительно контроля отмечено снижение величины  $pH_{KCl}$  на 0.31–0.66 ед.

Анализ зависимости агрохимических свойств почвы под посевами сахарной свеклы от уровня удобрений выявил, что изменение количества NPK в максимальной мере повышало содержание подвижного  $P_2O_5$  в слоях 0–20 см и 40–60 см, высокая корреляция выявлена для слоя 0–20 см ( $r^2 = 0.798$ ) (табл. 5), а на содержание обменного  $K_2O$  не доказано действие удобрений. Нитратный азот проявлял связь только в слое 40–60 см, а кислотные свойства почвы опыта примерно в одинаковой степени зависели от данного фактора, но для  $pH_{KCl}$  зависимость была обратной ( $pH_{KCl}$  в слое 20–40 см – в несколько большей степени).

Изучение агрохимических свойств почвы под озимыми культурами в севообороте выявило, что величина  $pH_{KCl}$  в почве под озимой пшеницей в

паровом звене была на 0.15–0.54 ед. больше, чем в клеверном звене (табл. 6), возможно, как вследствие подщелачивающего влияния навоза, так и подкисления при разложении свежих растительных остатков клевера. Снижение разницы отмечено при повышении уровня удобренности, а доза N120P120K120 + навоз 50 т/га увеличивала эти отличия. Почва парового звена относилась к слабокислой, клеверного – среднекислой. Отмечено изменение величины  $pH_{KCl}$  относительно контроля на 0.07–0.37 ед. в клеверном звене и на 0.18–0.25 – в паровом звене, более всего было заметно снижение в варианте N190P190K190. В паровом звене было отмечено увеличение  $pH_{KCl}$  при действии низкой дозы удобрений с навозом 25 т/га и высокой их дозы с навозом 50 т/га. Величина  $pH_{KCl}$  почвы под озимой пшеницей была на 0.45–0.90 ед. меньше, чем почвы под сахарной свеклой, в клеверном звене – на 0.28–0.70 ед., с увеличением доз разница сокращалась вследствие более значительного их подкисляющего действия под посевами сахарной свеклы.

Последствие удобрений повышало содержание минерального азота ( $N-NO_3 + N-NH_4$ ) относительно контроля на 8.70–38.8% в почве под озимой пшеницей в клеверном звене, а в паровом звене повышение составило 8.10–133%. Содержание подвижного  $P_2O_5$  в почве в клеверном звене в удобренных вариантах повышалось на 21.3–71.6, в паровом – на 28.9–77.2%. Более всего влияние оказывали системы N90P90K90 + навоз 25 т/га, N135P135K135 + навоз 25 т/га и N190P190K190, создавая повышенную обеспеченность элементом питания. Увеличение количества внесенных удобрений последовательно повышало содержание  $P_2O_5$ , кроме системы N120P120K120 + навоз 50 т/га. Действие навоза в дозе 25 т/га проявилось в увеличении содержания элемента в паровом

**Таблица 5.** Зависимость показателей плодородия выщелоченного чернозема от уровня удобрения

Показатель	Глубина 0–20 см	Глубина 20–40 см	Глубина 40–60 см
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	–	–	$Y = 0.001 + 0.565X$ $r^2 = 0.506$
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	$Y = 0.014 + 6.23X$ $r^2 = 0.798$	$Y = 0.010 + 6.42X$ $r^2 = 0.632$	$Y = 0.014 + 6.23X$ $r^2 = 0.690$
K <sub>2</sub> O	–	–	–
H <sub>T</sub>	$Y = 0.022 + 3.42X$ $r^2 = 0.871$	$Y = 0.022 + 3.53X$ $r^2 = 0.837$	Не определяли
pH <sub>KCl</sub>	$Y = -0.011 + 5.91X$ $r^2 = 0.923$	$Y = -0.012 + 5.93X$ $r^2 = 0.802$	

Примечания. 1. Прочерк – связь отсутствует. 2.  $r^2$  – коэффициент корреляции.

**Таблица 6.** Агрохимические свойства почвы под посевами озимой пшеницы, слой 0–40 см

Озимая пшеница (звено с клевером)				Озимая пшеница (звено с паром)			
pH <sub>KCl</sub> , ед.	N <sub>мин</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	pH <sub>KCl</sub> , ед.	N <sub>мин</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
	мг/100 г почвы				мг/100 г почвы		
Контроль							
5.09	4.25	7.75	8.20	5.29	3.58	8.07	8.02
N45P45K45 + навоз 25 т/га							
5.02	5.17	9.40	7.70	5.40	8.35	10.4	7.95
N90P90K90 + навоз 25 т/га							
4.96	5.90	11.8	8.10	5.11	6.50	12.8	7.72
N135P135K135 + навоз 25 т/га							
4.94	5.10	12.9	7.80	5.11	5.05	14.3	8.02
N120P120K120 + навоз 50 т/га							
5.00	4.10	11.0	8.20	5.54	3.87	10.4	8.92
N190P190K190							
4.72	4.62	13.3	8.20	5.02	6.52	12.1	7.95
HCP <sub>05</sub>							
0.05	0.26	0.6	–	0.06	0.32	5.6	–

звене на 8.47–10.8% относительно клеверного звена. Калийный режим как в звене с клевером, так и с паром, не был подвержен изменениям. Почва относилась к среднеобеспеченной данным элементом.

Содержание P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> под озимыми в вариантах со средними и высокими дозами удобрений было сопоставимым с таковым под посевами сахарной свеклы, кроме контроля и системы N45P45K45 + + навоз 25 т/га, где в почве под зерновыми культурами содержание элемента было на 12.5–33.6% больше вследствие сниженного относительно сахарной свеклы поглощения. Содержание K<sub>2</sub>O в почве под посевами озимых культур было на 52.3–63.2% меньше, чем под сахарной свеклой,

усиление насыщенности удобрениями увеличивало разницу.

В почве как под овсом, так и под ячменем, величина pH<sub>KCl</sub> не была подвержена достоверным изменениям, под овсом отмечена тенденция к повышению показателя на 0.04–0.13 ед. (табл. 7), под ячменем – к снижению на 0.05 и 0.22 ед., т.к. на ячмень в большей мере влияли удобрения, внесенные под сахарную свеклу (первый год последствий), на овес – в меньшей степени (2-й год последствий). Величина pH<sub>KCl</sub> в почве под ячменем была на 0.05–0.23 ед. больше, чем под овсом, что возможно, было связано с биологическими особенностями культур. Увеличение разницы отмечено в контроле и при действии системы N120P120K120 + навоз 50 т/га. Кислотность

почвы под посевами овса была больше, чем сахарной свеклы, на 0.47–1.16 ед., ячменя – на 0.34–0.93 ед., удобренность сокращала разницу, в большей степени – под посевом ячменя.

Количество  $N_{\text{мин}}$  в почве под посевом ячменя увеличивалось относительно контроля на 23.6–76.1%, под посевом овса не было отмечено достоверного изменения показателя. Наибольшее действие удобренности на почву под посевами яровых культур проявилось на содержании подвижного  $P_2O_5$  (+16.3–44.4% к контролю под посевом овса); повышение уровня удобренности привело к последовательному увеличению показателя на 21.4, 44.3, 16.3 и 42.4% соответственно. В почве под посевом ячменя рост удобренности обеспечивал увеличение содержания  $P_2O_5$  на 6.59–71.4% относительно контроля, возрастающие дозы минеральных удобрений на фоне навоза 25 т/га также способствовали его повышению на 6.59, 42.2 и 13.0%, что свидетельствовало о том, что система  $N90P90K90$  + навоз 25 т/га относительно других в наибольшей степени влияла на накопление элемента. По сравнению с сахарной свеклой в почве под посевами яровых зерновых в контроле и при минимальной дозе удобрений содержание  $P_2O_5$  было больше на 11.4–65.3%. Увеличение уровня удобренности способствовало сокращению разницы в содержании элемента в вариантах.

Если в почве под посевом овса было отмечено достоверное увеличение содержания обменного  $K_2O$  на 4.00–23.3%, что, возможно, было связано с возделыванием клевера в этом звене севооборота, то под посевом ячменя его содержание не было подвержено изменению, возможно вследствие значительного выноса элемента калиелюбивым предшественником – сахарной свеклой (215–266 кг/га и более) [15]. В почве под посевом ячменя содержание элемента было на 7.04–28.9% больше, чем под посевом овса. Калийный режим почвы под посевом овса был на 53.6–60.7% более интенсивным, чем под посевом сахарной свеклы, ячменя – на 40.2–57.7%.

## ВЫВОДЫ

1. Выявлено значительное влияние уровня удобренности на содержание  $N-NO_3$ ,  $P_2O_5$ ,  $K_2O$  и нитрификационную способность почвы под посевом сахарной свеклы: показатели увеличились относительно контроля на 26.4–57.1, 38.0–132, 4.97–26.7 и 25.7–62.4% соответственно, что свидетельствовало о том, что уровень удобренности более всего влиял на фосфатный режим почвы, менее всего – на калийный режим. Отмечено обогащение почвы  $N-NO_3$  и повышение способности синтезировать нитраты в слое 20–40 см, тогда как накопление  $P_2O_5$  и  $K_2O$  отмечено в слое 0–20 см.

**Таблица 7.** Агрохимические свойства почвы под яровыми зерновыми, слой 0–40 см

Овес				Ячмень			
$pH_{\text{KCl}}$	$N_{\text{мин}}$	$P_2O_5$	$K_2O$	$pH_{\text{KCl}}$	$N_{\text{мин}}$	$P_2O_5$	$K_2O$
ед.	мг/кг почвы			ед.	мг/100 г почвы		
Контроль							
4.83	7.13	9.97	7.50	5.06	5.68	9.10	8.80
N45P45K45 + навоз 25 т/га							
4.92	10.8	9.27	7.10	5.01	9.93	9.70	7.60
N90P90K90 + навоз 25 т/га							
4.95	5.43	12.1	7.80	5.00	7.02	13.8	8.87
N135P135K135 + навоз 25 т/га							
4.87	7.44	14.4	8.07	4.84	10.0	15.6	10.4
N120P120K120 + навоз 50 т/га							
4.96	4.97	11.6	9.25	5.11	5.49	11.8	8.47
N190P190K190							
4.83	6.79	14.2	7.87	4.91	7.93	11.9	9.22
<i>HCP<sub>05</sub></i>							
–	–	7.3	3.0	–	0.42	6.4	–

2. Показатели  $pH_{\text{KCl}}$  и  $H_T$  в наибольшей степени изменялись в слое 20–40 см под влиянием максимальной дозы удобрений  $N190P190K190$ , изменение с ростом доз происходило нелинейно, вероятно вследствие неодинаковой буферности почвы. Математически доказано, что уровень удобренности в наибольшей степени влиял на физико-химические свойства почвы и содержание подвижного  $P_2O_5$ , а содержание  $K_2O$  и  $N-NO_3$  не зависело от дозы внесенных удобрений.

3. Обменная кислотность в почве под посевами зерновых культур была на 0.28–1.16 ед, меньше, чем под посевами сахарной свеклы, наибольшая разница отмечена под посевом овса, наименьшая – под посевом озимой пшеницы в клеверном звене. При увеличении доз удобрений разница сокращалась вследствие более значительного подкисляющего их действия под посевом сахарной свеклы. Содержание подвижного фосфора под зерновыми в контроле и при одинарной дозе был на 11.4–65.3% больше, чем в почве под сахарной свеклой. Содержание в почве подвижного  $K_2O$  было на 40.2–63.2% меньше, увеличение уровня удобренности почвы под зерновыми культурами способствовало сокращению разницы между вариантами.

4. Наибольшие изменения агрохимических свойств чернозема выщелоченного (повышение содержания NPK и различных форм кислотности), как результат сверхдлительного применения удобрений, были выявлены под посевами сахарной свеклы при использовании дозы  $N190P190K190$ ,

зерновых культур – при последствии системы удобрения N135P135K135 + навоз 25 т/га.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фрид А.С., Королева И.Е., Булгаков Д.С. Плодородие почв, основные понятия // Научные основы предотвращения деградации почв (земель) сельскохозяйственных угодий России и формирования систем воспроизводства их плодородия в адаптивно-ландшафтном земледелии. Т. 2. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2013. С. 5–8
2. Дзанагов С.Х., Лазаров Т.К., Калоев Б.С. Влияние длительного применения удобрений на показатели роста, урожайность и качество зерна озимой пшеницы // Агрохимия. 2019. № 4. С. 31–38.
3. Шеуджен А.Х. Агрохимия чернозема. Майкоп: Полиграф-ЮГ, 2015. 232 с.
4. Шеуджен А.Х., Онищенко Л.М., Суетов В.П. Плодородие и продуктивность чернозема выщелоченного при длительном применении удобрений в севообороте / Мат-лы Всерос. совещ. научн. учрежд.-участников Географ. сети опытов с удобрениями. М., 2016. С. 326–336.
5. Парамонов А.В., Пасько С.В. Влияние систематического применения удобрений на плодородие почвы в длительном стационарном полевом опыте / Там же. С. 204–209.
6. Кузнецов В.К., Санжарова Н.И., Серегин С.В. Оценка влияния длительного применения минеральных удобрений на свойства почв, качество продукции и накопление <sup>137</sup>Cs урожаем зерновых культур // Агрохимия. 2017. № 2. С. 64–72.
7. Никитина Л.В. Исследования калийного режима разных типов почв в длительных опытах Геосети // Агрохимия. 2018. № 1. С. 39–51.
8. Волынкин В.И., Волынкина О.В., Копылов А.Н. Изменение почвенного плодородия при длительном применении удобрений в Курганской области // Агрохимия. 2019. № 8. С. 3–13.
9. Прогноз производства сахара снижен до 6.2 млн тонн (обзор рынка): [Электр. ресурс] // Sugar.ru. URL: <https://sugar.ru/node/41457> (дата обращения 15.01.2023 г.).
10. Анасов И.В., Смирнов М.А. Производственно-техническая база свекловодства России // Сахар. 2020. № 10. С. 26–31.
11. Волынкин В.И., Волынкина О.В. Сравнительное действие минеральных и органических удобрений на выщелоченных черноземах Западной Сибири // Плодородие. 2014. № 4 (79). С. 17–19.
12. Шаповалова Н.Н., Годунова Е.И. Последствие 30-летнего применения минеральных удобрений на продуктивность чернозема обыкновенного Центрального Предкавказья // Плодородие. 2019. № 1 (106). С. 11–14.
13. Куницин Н.А., Минакова О.А. Последствие удобрений, применяемых в севообороте с сахарной свеклой, на плодородие чернозема выщелоченного, урожайность и качество зерновых культур в Центральном Черноземье // Рос. сел.-хоз. наука. 2021. № 6. С. 14–18.
14. Минакова О.А., Александрова Л.В., Подвигина Т.Н. Изменение физико-химических свойств чернозема выщелоченного и урожайности сахарной свеклы при длительном применении удобрений в ЦЧР // Агрохимия. 2021. № 2. С. 37–46.
15. Заришняк А.С., Руцкая С.И., Колибабчук Т.В. Влияние удобрений на потребление элементов питания культурами зерносвекловичного севооборота на черноземе оподзоленном // Агрохимия. 2003. № 6. С. 39–46.

## Fertility of Leached Chernozem as a Result of 85-Year Application of Fertilizers in Grain-Beet Crop Rotation under Conditions of the Central Black-Earth Region

O. A. Minakova<sup>a,#</sup>, L. V. Alexandrova<sup>a</sup>, and T. N. Podvignina<sup>a</sup>

<sup>a</sup>A.L. Mazlumov All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar  
p. VNISS 86, Ramonsky district, Voronezh region, Russia

<sup>#</sup>E-mail: olalmin2@rambler.ru

The use of fertilizers in the grain-beet crop rotation for 85 years significantly changed the agrochemical properties of leached chernozem, which were most pronounced in the optimization of the phosphate regime of the soil and least of all – potash. Fertilization changed the nitrogen regime and physico-chemical properties of the soil to a greater extent in a layer of 20–40 cm than –20 cm. It was found that the content of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in the soil under crops of grain crops was higher than under sugar beet crops, and K<sub>2</sub>O and pH<sub>KCl</sub> were less. The greatest changes in the agrochemical properties of the soil under sugar beet crops were noted when using N190P190K190, cereals – with the aftereffect of N135P135K135 + manure 25 t/ha.

*Key words:* long-term experiment, fertilizers, sugar beet, grain-crops, fertility, nutrient elements.

УДК 631.871:631.874:631.445.25:631.559

## ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ СОЛОМЫ И СИДЕРАТОВ НА СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЕ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ АГРОЦЕНОЗОВ

© 2023 г. И. Б. Сорокин<sup>1,\*</sup>, С. П. Кулижский<sup>2</sup>, О. А. Пасько<sup>3</sup>, О. Э. Мерзляков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Станция агрохимической службы “Томская”  
ул. Беринга, 12а, Томск 634063 Россия

<sup>2</sup>Томский государственный университет  
просп. Ленина, 36, 634050 Томск, Россия

<sup>3</sup>Национальный открытый институт г. Санкт-Петербург  
ул. Сестрорецкая, 6, Санкт-Петербург 197183, Россия

\*E-mail: sorokin.ib@mail.ru

Поступила в редакцию 09.03.2023 г.

После доработки 15.04.2023 г.

Принята к публикации 14.06.2023 г.

Исследование в полевом стационарном опыте на серой лесной почве Томской обл. доказало преимущество биологизации земледелия с применением биоресурсов агроценозов (соломы и сидератов) в зернопаровом севообороте. Регулярное внесение только N45 перед посевом обеспечило среднюю прибавку урожайности зерновых культур 4.3 ц/га (на 26%), соломы без азота – на 1.3 ц/га (на 7.5%). При внесении соломы с азотом в течение 20 лет получена прибавка урожайности, не превышающая суммарное действие азота и соломы, – 5.1 ц/га (на 30.7%). Применение сидерального пара на фоне регулярного внесения соломы обеспечило повышение урожайности зерновых культур на 3.8 ц/га (на 22.4%). Через 20 лет эксперимента снизилось среднее содержание гумуса в пахотном горизонте на 9.6% от исходного при применении чистого пара без внесения удобрений. Для сохранения потенциального плодородия внесение только соломы и (или) минерального азота в этом случае также было недостаточным. При этом пар сидеральный и регулярное внесение соломы обеспечили сохранение содержания гумуса в пахотном горизонте на исходном уровне. За 4 ротации (2001–2021 гг.) зернопарового севооборота отмечена возрастающая эффективность сидерального пара на фоне регулярного применения соломы в качестве удобрения по сравнению с вариантом чистого пара: в 1-й ротации урожайность зерновых культур в этих вариантах была на одном уровне, во 2-й – урожайность после сидерального пара была больше на 11.7%, чем после чистого пара, в 3-й ротации – соответственно больше на 18%, и в 4-й ротации сидеральный пар обеспечил лучшую урожайность зерновых культур, чем после чистого пара (увеличение на 36.5%).

*Ключевые слова:* биологизация, сидеральный пар, солома, гумус.

DOI: 10.31857/S0002188123090119, EDN: VXSLNU

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в мире актуализировался социальный запрос на качественные продукты питания [1] и соответствующие технологии сельскохозяйственного производства [2]. Особое внимание уделяется решению задач оптимизации объемов использования минеральных удобрений и пестицидов, постоянного воспроизводства почвенного плодородия, переходу от общепринятых агротехнологий к биоземледелию [3]. Биологизация земледелия требует повышения в севооборотах доли сидеральных бобовых культур, многолетних трав, научной оптимизации применения удобрений [4] и др. Новые подходы к управлению почвенным плодородием, продуктивностью рас-

тений и устойчивостью агроценозов, основанные на закономерностях почвенного плодородия, управления эдафическими и эпифитными процессами, позволяют повышать плодородие почвы и целенаправленно увеличивать потенциальный и эффективный ресурс сельскохозяйственного производства.

Наиболее распространенным способом повышения продуктивности культурных агроценозов является улучшение режима минерального питания сельскохозяйственных культур путем применения только минеральных удобрений и (или) чистых паров. В долговременном периоде такое землепользование ведет к снижению почвенного плодородия и, как следствие, к снижению про-

дуктивности агроценозов. Исследования в длительных опытах показали, что комплексное применение органических и минеральных удобрений обеспечивает высокую продуктивность севооборотов и рост содержания почвенного органического вещества в 1.2–1.6 раза, улучшение гумусового состояния почвы и повышение ее биологической активности [5–7].

Обобщение ряда исследований в длительных опытах с удобрениями Географической сети показало, что в биологизированных агротехнологиях при совместном применении минеральных и органических удобрений и использовании других биологических факторов прибавки урожайности по сравнению с контролем (без внесения удобрений) составляют от 30 до 100%, при применении только органических удобрений – от 20 до 70%. В качестве источника органических удобрений традиционно применяют продукты обмена сельскохозяйственных животных и компосты на основе навоза (помета). Вместе с тем, даже с учетом развития животноводства, при использовании всех ресурсов навоза и компостов в пахотных почвах России сохранится дефицит органического вещества и элементов минерального питания [8]. Поэтому кроме традиционных органических удобрений целесообразно повсеместно и комплексно использовать все возможные биоресурсы повышения почвенного плодородия в агроценозах: и солому с пожнивными остатками, и сидеральные культуры, и многолетние травы [9, 10].

Среди возделываемых сельскохозяйственных полевых культур только многолетние травы способны расширенно воспроизводить почвенное органическое вещество и другие показатели плодородия даже при отчуждении растительной массы. Другие культуры требуют восполнения органического вещества; особенно интенсивно минерализуется почвенное органическое вещество под пропашными культурами и чистым паром [11]. Эти особенности необходимо учитывать при планировании и совершенствовании севооборотов.

По темпам минерализации органического вещества, в условиях интенсивного земледелия сельскохозяйственные культуры различаются: почва под посевами зерновых теряет 0.9–1.1 т гумуса/га в год, кукурузы на силос – 1.2–1.3, сахарной свеклы и черного пара – 1.8–1.9 т гумуса/га в год. При этом возделывание люцерны повысило содержание гумуса за 18 лет на 0.15–0.44%. Комплексное применение приемов биологизации земледелия способствовало увеличению содержания гумуса на 0.06–0.1% [12].

Применение сидерации может иметь нежелательные эффекты. Ее использование на серой лесной среднесуглинистой почве меняло сезонную динамику скорости эмиссии  $\text{CO}_2$  из почвы. Происходило усиление процессов минерализации органического вещества за счет вновь поступившего на 38–131% по отношению к черному пару. Потерям подвергалось 19–79% углерода, аккумулированного в чистой первичной продукции редьки масличной [13]. Потерь можно избежать при использовании научно обоснованных способов внесения сидератов для обеспечения сельскохозяйственных культур возможностями продуктивного использования  $\text{CO}_2$  и элементов минерального питания. Например, последствие сидерата в севообороте пролонгируется при осенней заделке в почву зеленого удобрения – предварительно скошенную летом зеленую массу в расстил с приростом отавы вносят в почву при ранней осенней вспашке [14].

Цель работы – изучение влияния длительного применения соломы и сидератов на серой лесной почве на продуктивность агроценозов.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в длительном стационарном опыте по следующей схеме: 1 – контроль (без удобрений), 2 – N45, 3 – солома + N45, 4 – солома, 5 – солома + сидерат. Опыт заложен в Томской обл. в 1999 г. в производственных условиях на серой лесной тяжелосуглинистой почве (содержание гумуса – 3.6%,  $\text{pH}_{\text{KCl}}$  4.8, содержание  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 17.1,  $\text{K}_2\text{O}$  – 9.7 мг/100 г). Повторность опыта четырехкратная. Общая площадь делянки – 67.5 м<sup>2</sup> (15 × 4.5 м), площадь учетных площадок – 1 м<sup>2</sup>. В течение 4-х ротаций зернопарового севооборота (2000–2021 гг.) регулярно вносили солому (5 т/га) после уборки зерновой культуры и минеральный азот под предпосевную культивацию, а также в варианте 5 (солома 5 т/га + сидерат) 4 раза применяли сидерат (в начале каждой ротации) в сравнении с чистым паром. На делянках вариантов 1 и 2, где не вносили солому, после уборки зерновой культуры ее удаляли. Обработка почвы: до 2007 г. – отвальная вспашка, затем – минимальная поверхностная обработка.

Методы лабораторных испытаний: ГОСТ 26483-85 Почвы. Приготовление солевой вытяжки и определение pH по методу ЦИНАО; ГОСТ 26951-86 Почвы. Определение нитратов ионометрическим методом; ГОСТ 28268-89 Почвы. Методы определения влажности; ГОСТ Р 54650-2011 Почвы. Определение подвижных соединений

**Таблица 1.** Влияние регулярного внесения соломы (5 т/га) и сидерата на урожайность сельскохозяйственных культур (2001–2021 гг.), ц/га

Год	Культура	Варианты					НСР <sub>05</sub>
		1. Контроль	2. N45	3. Солома + + N45	4. Солома	5. Солома + + сидерат	
2001	Яровая пшеница	21.0	22.5	20.5	21.7	29.8	3.8
2002	Овес	8.8	18.4	20.2	13.1	9.5	2.5
2003	Яровая пшеница	13.9	21.1	22.0	14.1	16.7	4.6
2005	Ячмень	26.3	24.1	25.0	23.7	33.1	4.1
2006	Яровая пшеница	10.3	10.3	10.0	10.4	12.6	3.3
2008	Озимая пшеница	19.3	27.5	30.7	28.4	28.8	5.0
2009	Яровая пшеница	29.7	33.5	36.2	29.8	24.8	3.2
2010	Яровая пшеница	23.4	26.9	27.5	24.5	22.5	2.9
2012	Ячмень	10.7	9.5	10.8	10.1	18.2	5.5
2013	Овес	19.1	21.1	21.9	16.6	20.9	10.3
2014	Овес	21.0	22.6	26.5	17.4	20.6	4.6
2015	Яровая пшеница	8.7	12.1	12.3	8.7	10.6	2.6
2018	Ячмень	9.3	12.8	18.5	16.7	15.1	3.9
2019	Овес	24.1	36.0	33.3	25.6	31.8	6.8
2020	Рапс	8.3	13.6	12.0	8.9	12.3	3.8
2021	Яровая пшеница	16.1	24.6	21.9	17.7	19.7	3.1
Средняя урожайность за 2001–2021 гг.		16.7	21.0	21.8	18.0	20.4	
Прибавка	–	–	4.3	5.1	1.3	3.8	
	%		26.0	30.7	7.5	22.4	

Примечание. 2000, 2004, 2011, 2016 г. – пар, внесение сидерата; 2007, 2017 г. – нет данных.

фосфора и калия по методу Кирсанова; ГОСТ 26489-85 Почвы. Определение обменного аммония по методу ЦИНАО; ГОСТ 26213-91 Почвы. Определение органического вещества.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По сравнению с другими органическими удобрениями солома трансформируется в почве более медленно, причем скорость роста содержания гумуса доминирует над скоростью минерализации. В этом заключается ее полезное свойство в большей мере повышать потенциальное плодородие. Дозу минерального азота при закладке опыта рассчитывали для восполнения азота в почве, который потребляют микроорганизмы, активно размножающиеся при внесении соломы. Причем иммобилизация азота в наших опытах отмечена лишь в первый год после внесения соломы. Очевидно, при регулярном ежегодном внесении соломы наступает баланс азота, потребляемого почвенными микробами и возвращающегося в почву при естественном их отмирании. Это доказывает

вариант с регулярным внесением после зерновых культур соломы 5 т/га без азота, в котором урожайность культур не только не снижалась, но устойчиво повышалась до 10%.

На серой оподзоленной почве опыта регулярное внесение в течение 20 лет соломы без азота обеспечило достоверную среднемноголетнюю прибавку урожайности на 1.3 ц/га (на 7.5%) (табл. 1). Регулярное внесение минерального азота ежегодно обеспечивало максимальную прибавку урожайности в опыте, т.к. это нивелировало негативный эффект, связанный с дефицитом элемента в агроценозах северного земледелия. Применение азота с соломой не оказало синергетического эффекта, скорее это было сложение эффектов от применения соломы и азотных удобрений.

Регулярное внесение соломы и сидерата в паровом поле севооборота (производственного культурооборота) повысило среднемноголетнюю урожайность на 3.8 ц/га (на 22.4%) по сравнению с контролем без удобрений после чистого пара.

**Таблица 2.** Содержание органического вещества (гумуса) в почве стационара (2021 г.), %

Вариант	Глубина отбора образцов, см							Среднее в слое 0–40 см
	0–10		10–20		Среднее в слое 0–20 см	20–40		
	1	2	1	2		1	2	
1. Контроль	3.17	–	3.34	–	3.25	3.01	–	3.17
2. N45	3.53	+0.36	3.31	–0.03	3.42	2.55	–0.47	3.13
3. Солома + N45	3.37	+0.20	3.21	–0.13	3.29	2.54	–0.47	3.04
4. Солома	3.76	+0.59	3.16	–0.18	3.46	2.44	–0.57	3.12
5. Солома + сидерат	3.73	+0.56	3.55	+0.21	3.64	2.91	–0.10	3.40
<i>HCP</i> <sub>05</sub>		0.51		0.27			0.21	

Примечание. В графе – абсолютный показатель, 2 – прибавка.

При закладке полевого стационарного опыта в 1999 г. среднее содержание гумуса в пахотном горизонте (0–20 см) составляло 3.6%. Через 20 лет эксперимента применение чистого пара без внесения удобрений (контроль) снизило среднее содержание гумуса в пахотном горизонте на 9.6% от исходного, регулярное внесение соломы без минерального азота – на 4%, чуть больше были потери при внесении азота без соломы – на 5%, при применении соломы с азотом – на 8.6% (табл. 2). Очевидно, что внесение соломы с азотом смешало процессы ее деструкции в сторону минерализации, что обеспечивало наибольшее повышение урожайности в опыте. И только замена чистого пара сидеральным при регулярном внесении соломы обеспечила сохранение содержания гумуса в пахотном горизонте на исходном уровне. В слое 0–10 см наблюдали достоверное повышение содержания гумуса в вариантах 4 и 5. Это связано с тем, что в хозяйстве, где расположен опытный стационар, с 2007 г. применяли минимальную поверхностную обработку почвы (без вспашки).

**Таблица 3.** Влияние регулярного внесения соломы (5 т/га) и сидерата на урожайность сельскохозяйственных культур в ротациях зернопарового севооборота (2001–2021 гг.), ц/га

	Ротации			
	1-я	2-я	3-я	4-я
1. Контроль (без удобрений)	19.1	21.8	14.9	14.5
2. N45	24.6	24.5	16.3	21.8
3. Солома + N45	24.5	25.4	17.9	21.4
4. Солома	20.4	23.4	13.2	17.2
5. Солома + сидерат	18.7	24.4	17.6	19.7
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	5.5	1.9	1.8	3.7

Снижение содержания органического вещества (*ОВ*) в слое 20–40 см в вариантах опыта компенсировалось его увеличением в слое 0–10 см, поэтому в общем слое 0–40 см средняя разница содержания *ОВ* между вариантами опыта и контролем была не существенной, кроме варианта 5 с сидеральным паром, где гумуса было больше на 7.25% в сравнении с контролем.

Таким образом, длительное применение чистого пара в зернопаровом севообороте без внесения органических удобрений или при их недостаточном количестве (внесение только соломы), приводило к снижению содержания гумуса в почве. Замена чистого пара сидеральным в зернопаровом севообороте и регулярное внесение в почву соломы позволили в течение 20 лет сохранить содержание гумуса на исходном уровне.

Анализ данных урожайности сельскохозяйственных культур после каждого внесения сидерата (в ротациях) в севообороте показал, что влияние на урожайность совместного внесения сидерата и соломы со временем изменялось (табл. 3). В 1-й ротации севооборота урожайность зерновых культур после применения 2-х видов пара (контроль – чистый пар, вариант 5 – сидеральный пар) была на одном уровне, во 2-й ротации урожайность после сидерального пара была на 11.7% больше, после 3-го внесения сидерата урожайность увеличилась на 18%, после 4-го внесения сидерата урожайность увеличилась по сравнению с чистым паром на 36.5% (по данным 2018–2021 гг.).

Чистый пар без внесения удобрений способствовал постепенному снижению плодородия, обусловленному минерализацией почвенного органического вещества в отсутствие внесения органических удобрений. Применение сидерального пара с регулярным внесением в почву соломы

сохраняло плодородие почвы и урожайность на более высоком уровне. Таким образом, за 20 лет исследования результаты опыта в динамике показали возрастающее преимущество сидерального пара над чистым паром (без внесения удобрений) в повышении урожайности сельскохозяйственных культур.

## ВЫВОДЫ

1. Таким образом, иммобилизацию азота в наших опытах наблюдали лишь в 1-й год внесения соломы, в дальнейшем выявили баланс азота между его потреблением почвенными микробами и возвращением в почву при их естественном отмирании. Это показал вариант с регулярным внесением после зерновых культур соломы без минерального азота, где не только не снижалась урожайность, а была обеспечена достоверная среднесуточная прибавка урожайности на 1.3 ц/га (на 7.5%).

2. Через 20 лет применения чистого пара без внесения удобрений в зернопаровом севообороте снизилось среднее содержание гумуса в пахотном горизонте на 9.6% от исходного, регулярное внесение соломы без минерального азота снизило содержание гумуса на 4%, чуть больше были потери при внесении азота без соломы – 5%, при применении соломы с азотом – 8.6% в слое 0–20 см. И только замена чистого пара сидеральным при регулярном внесении соломы обеспечили сохранение содержания гумуса в пахотном горизонте на исходном уровне.

3. В 1-й ротации севооборота урожайность культур после применения 2-х видов пара (чистого пара – в контроле и сидерального) была на одном уровне; во 2-й ротации урожайность после сидерального пара была на 11.7% больше; после 3-го внесения сидерата урожайность увеличилась на 18%; после 4-го внесения сидерата урожайность увеличилась по сравнению с чистым паром на 36.5%. Таким образом, отмечена возрастающая со временем эффективность сидерального пара на фоне регулярного внесения соломы перед чистым паром без внесения органических удобрений.

4. Проведенное исследование имеет значение для прогнозирования баланса почвенного органического вещества при использовании почв в сельскохозяйственном производстве, создании математических моделей, проектировании систем питания, севооборотов, систем земледелия, а также в решении вопросов биологизации земледелия как в интенсивном, так и в органическом производстве.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Organic in Europe: Prospects and developments 2023. Электр. ресурс. Режим доступа: <https://www.organicseurope.bio/?redirect=1>
2. *Zavrzhnov A., Vedishchev S., Kadomtsev A.I., Pavlov A., Prokhorov A., Vygzov M.* Methods for restoring fertility and improving physical and mechanical properties of soils // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/845/1/012045>
3. *Pasko O., Stauraskaya N., Zakharchenko A., Zharnikov V., Larionov Y.* Bio-farming as the basis of environmentally-sustainable arable farming at the time of global warming // Res. Anthol. Strateg. Ach. Agricultural Sustain. 2022. P. 600–627.
4. *Ляцев А.А.* Почвенная биота и плодородие почвы в условиях юга Западной Сибири. Тюмень: ТюмГСХА, 2004. 252 с.
5. *Васбиева М.Т.* Изменение агрохимических показателей дерново-подзолистой почвы Предуралья при длительном применении удобрений // Почвоведение. 2021. № 1. С. 90–99. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21010135>
6. *Мерзлая Г.Е.* Эффективность длительного применения биологизированных систем удобрения // Агрохимия. 2018. № 10. С. 27–33. <https://doi.org/10.1134/S0002188118100113>
7. *Мерзлая Г.Е.* Исследование устойчивости агроценозов при длительном применении удобрений на дерново-подзолистой почве // Почвоведение. 2021. № 3. С. 355–362. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21030126>
8. *Еськов А.И., Лукин С.М., Мерзлая Г.Е.* Современное состояние и перспективы использования органических удобрений в сельском хозяйстве России // Плодородие. 2018. № 1 (100). С. 20–23.
9. *Сорокин И.Б., Титова Э.В., Касимова Л.В.* Растительное органическое вещество как основа почвенного плодородия // Земледелие. 2008. № 1. С. 14–15.
10. *Сорокин И.Б., Титова Э.В., Сиротина Е.А., Малиновская Л.А., Петрова Л.В.* Влияние биоресурсов агроценозов на продуктивность и экологическую устойчивость агроландшафтов // Пробл. агрохим. и экол. 2014. № 2. С. 19–23.
11. Ресурсы органических удобрений в сельском хозяйстве России (Информ.-аналит. справ-к) / Под ред. А.И. Еськова. Владимир: ВНИПТИОУ, 2006. 200 с.
12. *Коржов С.И., Трофимова Т.А., Котов Г.В.* Влияние полевых культур и приемов биологизации на сохранение почвенного плодородия // Плодородие. 2017. № 6 (99). С. 25–28.
13. *Соколова, Л.Г., Зорина С.Ю., Белоусова Е.Н., Поморцев А.В., Дорофеев Н.В.* Эмиссия CO<sub>2</sub> при введении краткосрочной сидерации в паровое поле в условиях лесостепной зоны Прибайкалья // Почвоведение. 2021. № 10. С. 1262–1273. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21100117>
14. *Сорокин И.Б.* Возобновляемые биоресурсы повышения плодородия пахотных почв подтаежной зоны Западной Сибири: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Омск: ОмскГАУ им. П.А. Столыпина, 2013. 40 с.

## Effect of Long-Term Use of Straw and Siderates on Gray Forest Soil on the Productivity of Agrocenoses

I. B. Sorokin<sup>a,#</sup>, S. P. Kulizhskiy<sup>b</sup>, O. A. Pasko<sup>c</sup>, and O. E. Merzlyakov<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Substation of agrochemical service "Tomsk"  
ul. Beringa 12a, Tomsk 634063, Russia*

<sup>b</sup>*Tomsk State University  
prosp. Lenina 36, Tomsk 634050, Russia*

<sup>c</sup>*National Open Institute  
St. Petersburg, Sestroretskaya ul. 6, St. Petersburg 197183, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: sorokin.ib@mail.ru*

A study in a stationary field experiment on gray forest soil of the Tomsk region proved the advantage of biologization of agriculture with the use of biological resources of agrocenoses (straw and siderates) in the grain-steam crop rotation. Regular application of only N45 before sowing provided an average increase in grain yield of 4.3 c/ha (by 26%), straw without nitrogen – by 1.3 c/ha (by 7.5%). When applying straw with nitrogen for 20 years, an increase in yield was obtained, not exceeding the total effect of nitrogen and straw – 5.1 c/ha (by 30.7%). The use of sideral steam against the background of regular application of straw provided an increase in the yield of grain crops by 3.8 c/ha (by 22.4%). After 20 years of the experiment, the average humus content in the arable horizon decreased by 9.6% from the initial when using pure steam without fertilizers. In order to preserve the potential fertility, the introduction of only straw and (or) mineral nitrogen in this case was also insufficient. At the same time, the lateral steam and regular application of straw ensured the preservation of the humus content in the arable horizon at the initial level. During 4 rotations (2001–2021) of the grain-steam crop rotation, the increasing efficiency of sideral steam was noted against the background of regular use of straw as fertilizer compared to the pure steam variant: in the 1st rotation, the yield of grain crops in these variants was at the same level, in the 2nd – the yield after sideral steam was 11.7 more% more than after pure steam, in the 3rd rotation – respectively 18% more, and in the 4th rotation, sideral steam provided better grain yields than after pure steam (an increase of 36.5%).

*Keywords:* biologization, sideral steam, straw, humus.

УДК 58.071:631.417.2:581.4:581.132:577.175.1:58.032.3

## СОВМЕСТНОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ШТАММА PGPB *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D И ГУМИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ НА РОСТ, СОДЕРЖАНИЕ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ И ФИТОГОРМОНОВ В РАСТЕНИЯХ ПШЕНИЦЫ В УСЛОВИЯХ ЗАСУХИ<sup>§</sup>

© 2023 г. А. В. Феоктистова<sup>1,\*</sup>, М. Д. Тимергалин<sup>1</sup>, Т. В. Рамеев<sup>1</sup>, С. П. Четвериков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Уфимский институт биологии — обособленное структурное подразделение  
Уфимского федерального исследовательского центра РАН  
450054 Уфа, просп. Октября, 69, Россия

\*E-mail: feoktistova.arisha@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.03.2023 г.

После доработки 08.04.2023 г.

Принята к публикации 14.06.2023 г.

Показано накопление сырой массы растений пшеницы при обработке штаммом бактерий *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D и гуминовыми веществами при дефиците почвенной влаги. Стимуляция роста растений связана с активацией роста корня, что приводило к увеличению индекса азотного баланса и концентрации хлорофилла в побегах обработанных растений. Обнаруженное увеличение концентрации хлорофилла в растениях, обработанных *P. plecoglossicida* 2,4-D, коррелировало со снижением содержания абсцизовой кислоты в побегах, а у растений, обработанных гуматами — с увеличением цитокининов в побегах. Более высокая эффективность обработки растений комбинацией бактерий и гуминовых веществ, чем любым из них в отдельности, может быть связана с аддитивным эффектом этих обработок на гормональный баланс.

**Ключевые слова:** *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D, пшеница, засуха, фитогормоны.

**DOI:** 10.31857/S0002188123090065, **EDN:** VEZILD

### ВВЕДЕНИЕ

Ростстимулирующие бактерии (*PGPB*) стали очень популярными благодаря своей способности активировать рост растений и повышать их продуктивность [1–3]. Ростостимулирующее действие бактерий проявляется не только в благоприятных условиях произрастания растений, а чаще всего при эдафических стрессах [4–6]. Многочисленные работы посвящены повышению засухоустойчивости растений за счет поддержания их роста под влиянием PGP-бактерий [7]. Поиск путей повышения продуктивности растений в условиях засухи имеет фундаментальное и практическое значение, поскольку засушливые регионы широко распространены, а недостаток влаги приводит к критическим потерям урожая [8]. В недавних работах показано, что PGP-бактерии из рода *Bacillus* улучшали прорастание семян, активировали рост проростков и усвоение калия растениями сои [9], *Azospirillum lipoferum* усиливали

ветвление корней растений кукурузы при избытке почвенной влаги [10], *Bacillus cereus* смягчали тепловой стресс у томатов [11], *Rhizobium leguminosarum* и *Paenibacillus polymyxa* повышали продуктивность растений пшеницы при засолении почвы [12].

Наряду с PGPB для повышения продуктивности растений в условиях засухи также применяются гуминовые вещества [13]. Гуминовые вещества (ГВ), состоящие из гумусовых кислот (гуминовые и фульвокислоты), являются продуктами разложения органического вещества, их извлекают из бурого угля, торфа и других источников [14–16]. Применение гумата калия при подкормке семян и внесении в почву повышало продуктивность и качество волокна хлопчатника [17], гуминовые кислоты стимулировали рост побегов огурца за счет усиления регуляции генов, кодирующих аквапорины, тем самым увеличивая гидравлическую проводимость корней [18]. Многочисленные исследования рекомендуют использовать в сельском хозяйстве в качестве биостимуляторов либо PGP-бактерии, либо гуминовые вещества.

<sup>§</sup> Исследование выполнено при поддержке гранта РФФ № 22-26-00147, <https://rscf.ru/project/22-26-00147/>.

Однако работ, рассматривающих действие *PGPB* в сочетании с ГВ, чрезвычайно мало. Недостаток информации по этой теме приводит к тому, что некоторые важные аспекты остаются нерешенными. Было показано, что ГВ могут стимулировать рост бактерий [19], но остается неясным, является ли этот эффект более важным для роста растений, чем прямое действие гуматов на сами растения.

Способность *PGP*-бактерий синтезировать растительные гормоны и влиять на концентрацию фитогормонов в растениях рассматривается как один из основных механизмов, стимулирующих рост растений [3, 20, 21]. Недавно было показано, что комбинация *PGP*-бактерий и ГВ увеличивала концентрацию ауксинов в корнях растений пшеницы, тем самым стимулируя их ветвление [22]. Однако влияние такой обработки на концентрацию других гормонов не изучали. Между тем цитокинины и абсцизовая кислота являются гормонами растений, которые чаще, чем ауксины, участвуют в реакции растений на засуху [23, 24]. Учитывая все сказанное выше, цель работы – изучение влияния бактерий, стимулирующих рост растений, и гуминовых веществ на содержание хлорофилла, индекс азотного баланса, концентрацию цитокининов и абсцизовой кислоты в растениях пшеницы, выращенных в условиях засухи.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Источником гуминовых веществ послужил бурый уголь Тюльганского месторождения в Оренбургской обл. РФ. Уголь смешивали с 0.1 М КОН в соотношении 1 : 10 и извлекали ГВ в течение 1 сут. Осадок удаляли центрифугированием при 12000 об./мин в течение 10 минут. Затем к надосадочной жидкости по каплям добавляли 0.1 М HCl до достижения pH 3.0 и перемешивали в течение 1 мин. Фракции фульвово́й кислоты (надосадочная жидкость) и гуминовой кислоты (осадок) отделяли центрифугированием при 12000 об./мин в течение 10 мин, затем осадок промывали холодной дистиллированной водой. Образцы гуминовой и фульвово́й кислот высушивали при 60°C. Для обработки растений использовали 0.1% водный раствор совместного экстракта гуминовой и фульвокислот.

В работе использовали штамм бактерий *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D, описанный в статье [25], способный накапливать индолил-3-уксусную кислоту (ИУК) в питательных средах [26]. Бактерии для обработки растений культивировали в течение 3-х сут в жидкой питательной среде

Кинг Б [22]. Количество клеток в культурах определяли путем последовательного разведения среды Кинг Б агар-агаром (15 г/л) и последующего подсчета количества колониеобразующих единиц (КОЕ). Бактериальную культуру разводили стерильной водой для получения раствора для опрыскивания растений, содержащего  $(1.0 \pm 0.5) \times 10^8$  КОЕ/мл.

Эксперименты проводили с мягкой яровой пшеницей (*Triticum aestivum* L., сорт Кинельская юбилейная). Растения выращивали на светоплощадке при 14-часовом фотопериоде, температуре 23–25/18°C день/ночь и освещении 400 мкмоль м<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup> фитолампами Osram fluoqa L36/W77 (Мюнхен, Германия). Семена пшеницы стерилизовали в 2%-ном растворе гипохлорита натрия в течение 10 мин, затем семена промывали дистиллированной водой и проращивали в течение 3-х сут. Проростки сажали в горшки с песком. Песок использовали из-за отсутствия в нем ГВ. Контрольные варианты эксперимента (нормальные условия) поливали, ежедневно поддерживая уровень влажности 50–60% от общей влагоемкости песка, дефицит воды – на уровне 20–30%.

Обработку растений суспензией бактерий и/или гуматами проводили через 3 сут путем опрыскивания.

Содержание гормонов определяли методом иммуноферментного анализа через 3 сут после обработки. Для этого побеги и корни гомогенизировали и экстрагировали 80%-ным этиловым спиртом. Спиртовой экстракт выпаривали до водного остатка, центрифугировали и отбирали аликвоты надосадочной жидкости для анализа. Очистку и концентрирование АБК проводили по модифицированной схеме с уменьшением объема [5]. Цитокинины концентрировали на колонке (картридж С-18) и разделяли с помощью тонкослойной хроматографии [27, 28]. Гормоны подвергали иммуноанализу с использованием соответствующих специфических антител.

Концентрацию хлорофилла и индекс азотного баланса (*NBI*) измеряли с помощью портативного анализатора растений Dualex Scientific+ (Force-A, Париж, Франция) на 7-е сут после обработки растений, а показатели роста (масса побегов и корней, длина побега) оценивали через 2 нед.

Данные выражены в виде средних, которые были рассчитаны при всех обработках с использованием программы MS Excel. Значимые различия между средними были проанализированы с помощью однофакторного дисперсионного анализа ANOVA и критерия Дункана. Данные обра-

ботаны с использованием программного обеспечения Statistica 10 (Statsoft, Москва, Россия).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В отсутствие обработок засуха значительно подавляла рост растений пшеницы, что проявлялось в торможении роста побегов (рис. 1а) и в снижении массы как побегов, так и корней по сравнению с хорошо обеспеченными водой контрольными растениями (рис. 1б). В условиях дефицита воды инокуляция растений пшеницы бактерией, либо обработка ГВ, примененная по отдельности или в комбинации, стимулировали линейный рост побегов, так что их длина не отличалась от длины хорошо обеспеченных водой растений. Не было никакой разницы в длине побега между растениями, обработанными только бактерией или гуминовыми веществами, однако комбинация бактерий с ГВ была более эффективной, что проявлялось в наибольшей длине побега.

Масса побегов растений в условиях засухи была меньше, чем растений, не испытывавших недостаток влаги, и увеличение массы побегов во всех вариантах обработки было статистически незначимым. Вызванное засухой снижение массы корней было меньше, чем снижение массы побега. Тем не менее, масса корней контрольных растений, не обработанных ни бактериями, ни гуматами, снижалась в условиях засухи по сравнению с хорошо обеспеченными водой растениями. Была выявлена относительная активация роста корней, которая проявлялась в увеличении соотношения масс корень : побег, это хорошо известная адаптивная реакция на дефицит воды, позволяющая оптимизировать поиск воды растениями в почве и ее поглощение в условиях засухи.

Обработка растений пшеницы бактериями и ГВ повышала массу корней в условиях дефицита воды до уровня растений, не испытывавших ее дефицит. Ранее было показано, что ростстимулирующий эффект штамма бактерий *P. plecoglossicida* 2,4-D обусловлен его способностью продуцировать ауксины и увеличивать их концентрацию в корнях, тем самым увеличивая массу корней [22], поскольку известно, что этот гормон стимулирует рост боковых корней [29]. Гуминовые вещества также увеличивали концентрацию ауксинов в корнях [16]. Был обнаружен аддитивный эффект в комбинации ГВ и бактерий по сравнению с применением их по отдельности, и это могло быть связано с увеличением продукции бактериального ауксина, индуцируемого гуминовыми веществами, тем самым способствуя активации роста корня [22].

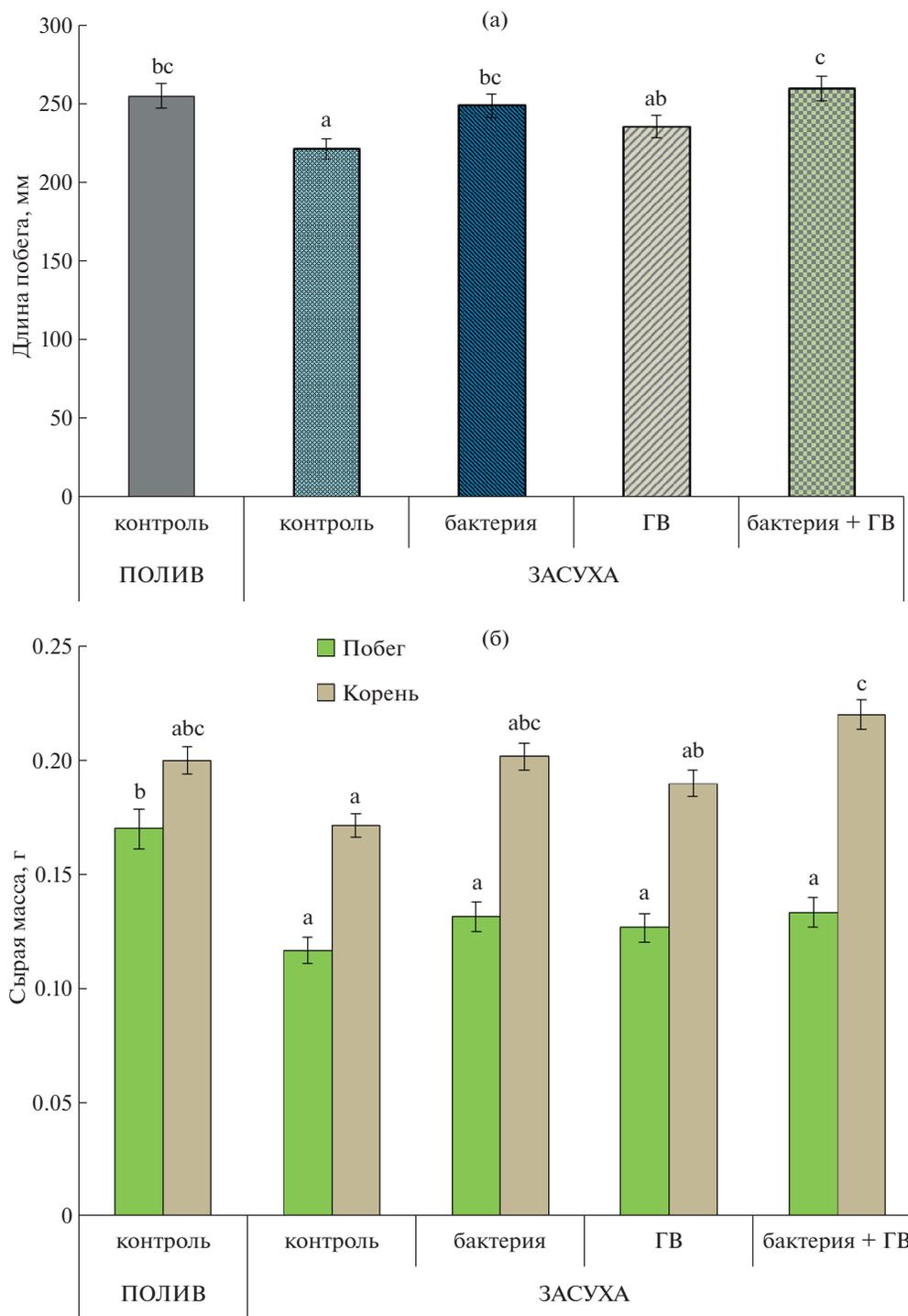
Концентрация хлорофилла снижалась при дефиците воды (рис. 2а), в то время как все обработки растений увеличивали концентрацию хлорофилла до уровня контрольных, хорошо обеспеченных водой растений. Не было никакой существенной разницы в концентрации хлорофилла между растениями, обработанными либо бактериями, либо ГВ, примененными отдельно, но их комбинация привела к значительно более высокой концентрации пигмента.

У растений, не обработанных ни ГВ, ни бактериями, индекс азотного баланса в листьях уменьшался в условиях засухи, в то время как каждая обработка и их комбинация увеличивали этот показатель до уровня контрольных растений (рис. 2б).

Тенденция к накоплению АБК в побегах растений, испытывавших дефицит воды, по сравнению с контролем была статистически незначимой (рис. 3а). Концентрация АБК в побегах растений, обработанных ГВ, была значительно больше, чем в растениях, обработанных бактериями (отдельно или в комбинации с ГВ). Дефицит воды увеличивал концентрацию АБК в корнях контрольных растений (не обработанных ни бактериями, ни ГВ), а также в корнях растений, обработанных гуматами. Бактериальная обработка (отдельно или в комбинации с ГВ) предотвращала накопление АБК, вызванное засухой.

Концентрация цитокининов в побегах была значительно больше только при обработке гуматами (рис. 3б). Все остальные варианты (включая контроль в условиях засухи) существенно не влияли на концентрацию цитокининов в побегах. Засуха увеличила концентрацию цитокининов в корнях всех растений, за исключением тех, которые обрабатывали комбинацией гуматов с бактериями. Концентрация цитокининов была самой высокой в корнях растений, обработанных только гуминовыми веществами.

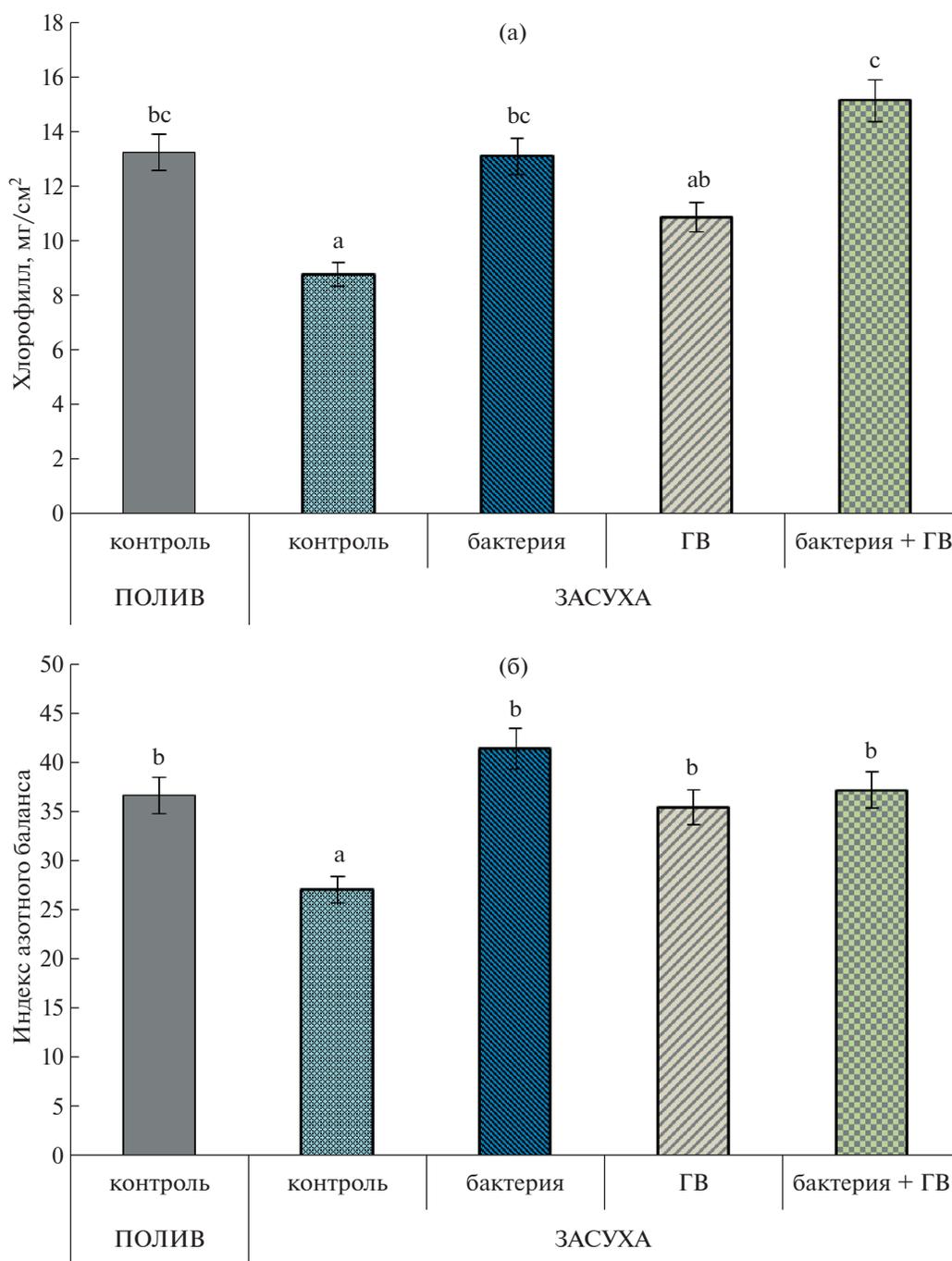
Повышенный индекс азотного баланса соотносился с концентрацией хлорофилла в листьях пшеницы под влиянием обработок бактерией и гуматами. Была обнаружена высокая корреляция между концентрацией хлорофилла и массой растения ( $r = 0.85$ ). Увеличение концентрации хлорофилла было наиболее выраженным в растениях, обработанных только бактериями и их комбинацией с гуматами. Интересно, что больший эффект этих вариантов был связан со снижением концентрации АБК в побегах растений. Известно, что АБК участвует в ускоренной деградации хлорофилла [30], и следовательно, снижение концентрации этого гормона может способствовать повышению концентрации хлорофилла. Сниже-



**Рис. 1.** Длина побегов (а), масса побегов и корней (б) растений пшеницы через 14 сут после обработки штаммом бактерий *Pseudomonas plecoglossida* 2,4-D (бактерия), гуминовыми веществами (ГВ) и их комбинацией (бактерия + ГВ) в условиях нормального полива (полив) и дефицита воды (засуха). Статистически отличающиеся средние отмечены разными буквами,  $p \leq 0.05$ . То же на рис. 2, 3.  $n = 15$  (ANOVA, Duncan's test).

ние концентрации АБК было обнаружено как в побегах, так и в корнях растений, обработанных бактериями либо отдельно, либо в комбинации с ГВ. Известно, что некоторые бактерии способны

катаболизировать АБК, тем самым снижая концентрацию этого гормона в обработанных растениях [31]. Снижение концентрации АБК обнаружено в растениях, инокулированных *P. plecoglossi-*

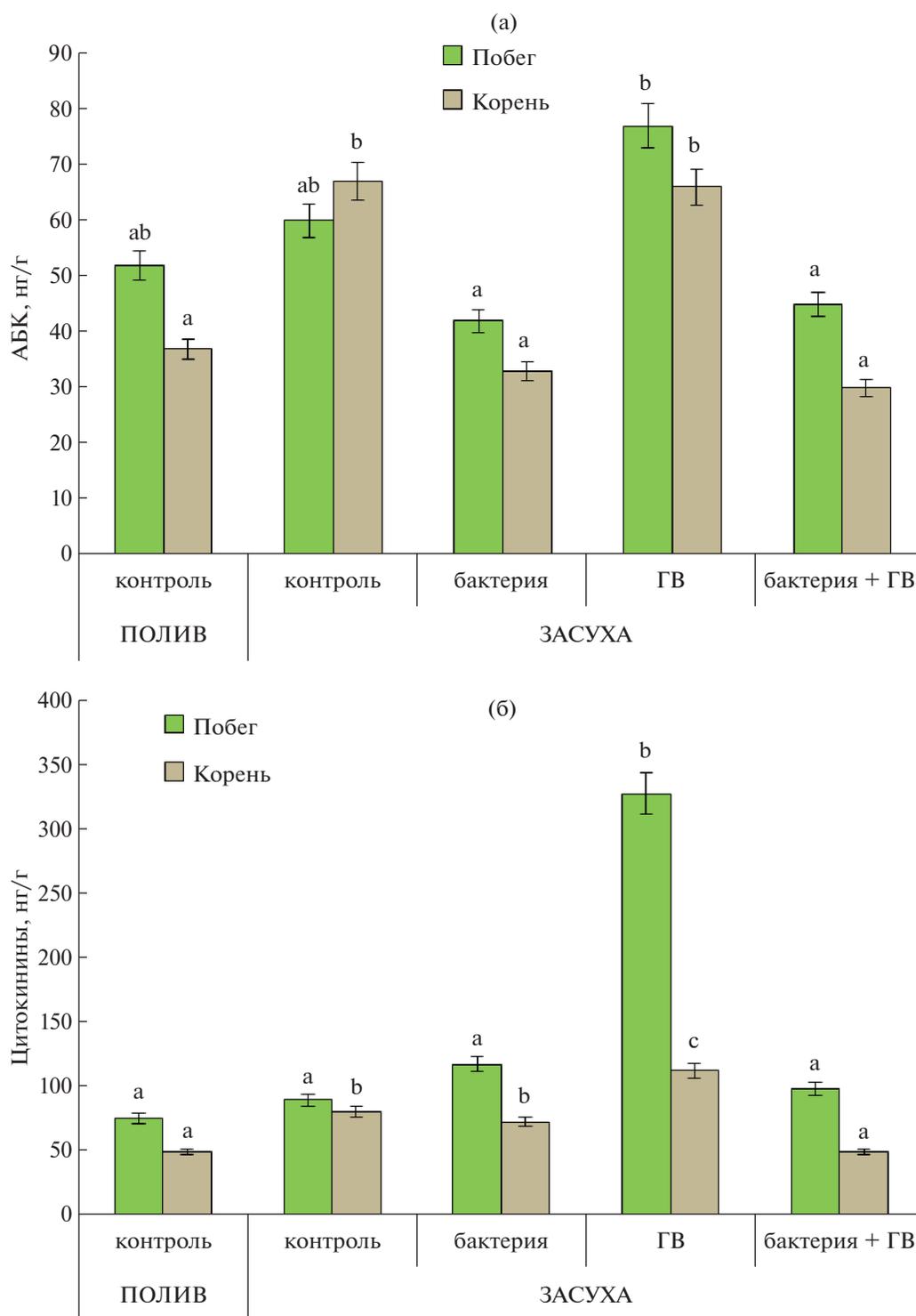


**Рис. 2.** Концентрация хлорофилла (а) и индекс азотного баланса (б) в листьях растений пшеницы через 7 сут после обработки.  $n = 30$  (ANOVA, Duncan's test).

*cida* 2,4-D, что свидетельствовало о способности этого бактериального штамма катаболизировать АБК.

Содержание АБК в листьях растений, обработанных только гуматами, не снижалось по сравнению с контрольными растениями, подвергнутыми засухе, а концентрация хлорофилла при этом повышалась. Вероятно, это было связано с

накоплением цитокининов в побегах растений, обработанных гуматами (рис. 3б). Цитокининоподобная активность была обнаружена у различных гуминовых веществ [32], и обработка растений пшеницы ГВ увеличила концентрацию цитокинина в побегах [16]. Известно, что цитокинины действуют как антагонисты АБК, предотвращая деградацию хлорофилла [33]. Этим объясняется



**Рис. 3.** Концентрации АБК (а) и цитокининов (б) в побегах и корнях растений пшеницы через 3 сут после обработки.  $n = 9$  (ANOVA, Duncan's test).

повышенная концентрация хлорофилла в листьях растений, обработка которых гуматами повышала концентрацию цитокининов. Тем не менее, концентрация хлорофилла в растениях, об-

работанных ГВ, была меньше, чем в растениях, обработанных комбинацией ГВ с бактериями. Этот эффект может быть объяснен высоким содержанием АБК в побегах растений пшеницы,

обработанных гуминовыми веществами. Тем не менее, возможно и другое объяснение. Корни растений, обработанных ГВ, характеризовались высокой концентрацией цитокининов, в то время как известно, что эти гормоны подавляют рост корней [34–36]. Таким образом, повышенная концентрация цитокининов в растениях, обработанных гуматами, является очевидной причиной обнаруженного снижения массы корней растений. Интересно, что концентрация цитокинина не была повышена в корнях растений, обработанных комбинацией гуминовых веществ и бактерий. Это может быть объяснено способностью этого штамма продуцировать ауксины [25, 26], которые, как известно, повышают активность цитокиноксидаз [37], тем самым подавляя накопление цитокининов.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, было выявлено накопление сырой массы растений пшеницы при обработке их *P. plecoglossicida* 2,4-D и гуминовыми веществами в условиях засухи. Это может найти применение в сельскохозяйственной практике, поскольку известно, что скорость роста коррелирует с продуктивностью растений. Было показано, что стимулирование роста растений связано с активацией роста корней, что приводило к увеличению индекса азотного баланса и концентрации хлорофилла в обработанных растениях. Повышение концентрации хлорофилла также было связано со снижением концентрации АБК в растениях, обработанных бактериями, и увеличением концентрации цитокининов в побегах, обработанных ГВ. Повышенная эффективность обработки растений комбинацией бактерий и гуматов, чем любым из них по отдельности, могла быть связана с дополнительным действием этих обработок на гормональный баланс растений пшеницы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ruzzi M., Aroca R. Plant growth-promoting rhizobacteria act as biostimulants in horticulture // *Sci. Hortic.* 2015. V. 196. P. 124–134. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.08.042>
2. Backer R., Rokem J.S., Piangumaran G., Lamont J., Praslickova D., Ricci E., Subramanian S., Smith D.L. Plant growth-promoting rhizobacteria: Context, mechanisms of action, and roadmap to commercialization of biostimulants for sustainable agriculture // *Front. Plant Sci.* 2018. V. 9. P. 1473. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01473>
3. Kudoyarova. G., Arkhipova T., Korshunova T., Bakaeva M., Loginov O., Dodd I.C. Phytohormone mediation of interactions between plants and non-symbiotic growth promoting bacteria under edaphic stresses // *Front. Plant Sci.* 2019. V. 10. P. 1368. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01368>
4. Richardson A.E., Barea J.M., Mc Neill A.M., Prigent-Combaret C. Acquisition of phosphorus and nitrogen in the rhizosphere and plant growth promotion by microorganisms // *Plant Soil.* 2009. V. 321. P. 305–339. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-9895-2>
5. Kudoyarova G.R., Vysotskaya L.B., Arkhipova T.N., Kuzmina L.Y., Galimsyanova N.F., Sidorova L.V., Gabbasova I.M., Melentiev A.I., Veselov S.Y. Effect of auxin producing and phosphate solubilizing bacteria on mobility of soil phosphorus, growth rate, and P acquisition by wheat plants // *Acta Physiol. Plant.* 2017. V. 39. P. 253. <https://doi.org/10.1007/s11738-017-2556-9>
6. Meena V.S., Maurya B.R., Verma J.P. Does a rhizospheric microorganism enhance K<sup>+</sup> availability in agricultural soils? // *Microbiol. Res.* 2014. V. 169. P. 337–334. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2013.09.003>
7. Islam M.R., Sultana T., Joe M.M., Yim W., Cho J.-C., Sa T. Nitrogen-fixing bacteria with multiple plant growth-promoting activities enhance growth of tomato and red pepper // *J. Basic Microbiol.* 2013. V. 53. P. 1004–1015. <https://doi.org/10.1002/jobm.201200141>
8. Asari S., Tarkowská D., Rolčik J., Novák O., David Palmero D.V., Bejai S., Meijer J. Analysis of plant growth-promoting properties of *Bacillus amyloliquefaciens* UCMB5113 using *Arabidopsis thaliana* as host plant // *Planta.* 2017. V. 245. P. 15–30.
9. Bakhshandeh E., Gholamhosseini M., Yaghoobian Y., Pirdashti H. Plant growth promoting microorganisms can improve germination, seedling growth and potassium uptake of soybean under drought and salt stress // *Plant Growth Regul.* 2020. V. 90. P. 123–136. <https://doi.org/10.1007/s10725-019-00556-5>
10. Czarnes S., Mercier P.-E., Lemoine D.G., Hamzaoui J., Legendre L. Impact of soil water content on maize responses to the plant growth-promoting rhizobacterium *Azospirillum lipoferum* CRT1 // *J. Agro. Crop Sci.* 2020. V. 206. P. 505–516. <https://doi.org/10.1111/jac.12399>
11. Mukhtar T., Rehman S., Smith D., Sultan T., Seleiman M.F., Alsdon A.A. Mitigation of heat stress in *Solanum lycopersicum* L. by ACC-deaminase and exopolysaccharide producing *Bacillus cereus*: Effects on biochemical profiling // *Sustainability.* 2020. V. 12. P. 2159. <https://doi.org/10.3390/su12062159>
12. El-Sayed S.Y.S., Hagab R.H. Effect of organic acids and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) on biochemical content and productivity of wheat under saline soil conditions // *Middle East J. Agric. Res.* 2020. V. 9. P. 227–242. <https://doi.org/10.36632/mejar/2020.9.2.2>
13. Shen J., Guo M., Wang Y., Yuan X., Wen Y., Song X., Dong S., Guo P. Humic acid improves the physiological and photosynthetic characteristics of millet seedlings under drought stress // *Plant Signal. Behav.* 2020. V. 15. № 8. P. 1774212. <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1774212>

14. *Canellas L.P., Olivares F.L., Aguiar N.O., Jones D.L., Nebbioso A., Mazzei P.* Humic and fulvic acids as biostimulants in horticulture // *Sci. Hortic.* 2015. V. 196. P. 15–27.  
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.013>
15. *Olaetxea M., De Hita D., Garcia C.A., Fuentes M., Baignorri R., Mora V.* Hypothetical framework integrating the main mechanisms involved in the promoting action of rhizospheric humic substances on plant root and shoot-growth // *Appl. Soil Ecol.* 2017. V. 123. P. 521–537. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.06.007>
16. *Nazarov A.M., Garankov I.N., Tuktarova I.O., Salmanova E.R., Arkhipova T.N., Ivanov I.I., Feoktistova A.V., Prostyakova Z.G., Kudoyarova G.R.* Hormone balance and shoot growth in wheat (*Triticum durum* Desf.) plants as influenced by sodium humates of the granulated organic fertilizer // *Agricult. Biol.* 2020. V. 55. P. 945–955.
17. *Ullah A., Ali M., Shahzad K., Ahmad F., Iqbal S., Rahman M.H.U., Ahmad S., Iqbal M.M., Danish S., Fahad S., Alkahtani J.* Impact of seed dressing and soil application of potassium humate on cotton plants productivity and fiber quality // *Plants.* 2020. V. 9. P. 1444. <https://doi.org/10.3390/plants9111444>
18. *Olaetxea M., Mora V., Bacaicoa E., Garnica M., Fuentes M., Casanova E., Zamarreño A.M., Iriarte J.C., Etayo D., Ederri I.* Abscisic acid regulation of root hydraulic conductivity and aquaporin gene expression is crucial to the plant shoot growth enhancement caused by rhizosphere humic acids // *Plant Physiol.* 2015. V. 169. P. 2587–2596.  
<https://doi.org/10.1104/pp.15.00596>
19. *Tikhonov V.V., Yakushev A.V., Zavgorodnyaya Y.A., Byzov B.A., Demin V.V.* Effects of humic acids on the growth of bacteria // *Euras. J. Soil Sci.* 2010. V. 43. P. 305–313.  
<https://doi.org/10.1134/S1064229310030087>
20. *Verbon E.H., Liberman L.M.* Beneficial microbes affect endogenous mechanisms controlling root development // *Trends Plant Sci.* 2016. V. 21. P. 218–229.  
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.01.013>
21. *Cueva-Yesquén L.G., Goulart M.C., Attili de Angelis D., Nopper Alves M., Fantinatti-Garboggini F.* Multiple plant growth-promotion traits in endophytic bacteria retrieved in the vegetative stage from passionflower // *Front. Plant Sci.* 2021. V. 11. P. 621740.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2020.621740>
22. *Feoktistova A., Bakaeva M., Timergalin M., Chetverikova D., Kendjieva A., Rameev T., Hkudaygulov G., Nazarov A., Kudoyarova G., Chetverikov S.* Effects of humic substances on the growth of *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D and wheat plants inoculated with this strain // *Microorganisms.* 2022. V. 10. P. 1066.  
<https://doi.org/10.3390/microorganisms10051066>
23. *Hai N.N., Chuong N.N., Tu N.H.C., Kisiyala A., Hoang X.L.T., Thao N.P.* Role and regulation of cytokinins in plant response to drought stress // *Plants (Basel).* 2020. V. 9. P. 422.  
<https://doi.org/10.3390/plants9040422>
24. *Muhammad Aslam M., Waseem M., Jakada B.H., Okal E.J., Lei Z., Saqib H.S.A., Yuan W., Xu W., Zhang Q.* Mechanisms of abscisic acid-mediated drought stress responses in plants // *Inter. J. Mol. Sci.* 2022. V. 23. P. 1084.  
<https://doi.org/10.3390/ijms23031084>
25. *Chetverikov S.P., Sharipov D.A., Korshunova T.Y., Loginov O.N.* Degradation of perfluorooctanyl sulfonate by strain *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D // *Appl. Biochem. Microbiol.* 2017. V. 53. P. 533–538.  
<https://doi.org/10.1134/S0003683817050027>
26. *Bakaeva M., Kuzina E., Vysotskaya L., Kudoyarova G., Arkhipova T., Rafikova G., Chetverikov S., Korshunova T., Chetverikova D., Loginov O.* Capacity of *Pseudomonas* strains to degrade hydrocarbons, produce auxins and maintain plant growth under normal conditions and in the presence of petroleum contaminants // *Plants.* 2020. V. 9. P. 379.  
<https://doi.org/10.3390/plants9030379>
27. *Vysotskaya L.B., Korobova A.V., Veselov S.Y., Dodd I.C., Kudoyarova G.R.* ABA mediation of shoot cytokinin oxidase activity: assessing its impacts on cytokinin status and biomass allocation of nutrient deprived durum wheat // *Funct. Plant Biol.* 2009. V. 36. P. 66–72.
28. *Kudoyarova G.R., Melentiev A.I., Martynenko E.V., Arkhipova T.N., Shendel G.V., Kuzmina L.Y., Dodd I.C., Veselov S.Yu.* Cytokinin producing bacteria stimulate amino acid deposition by wheat roots // *Plant Physiol. Biochem.* 2014. V. 83. P. 285–291.  
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.08.015>
29. *Nacry P., Canivenc G., Muller B., Azmi A., Onckelen H.V., Rossignol M., Doumas P.* A role for auxin redistribution in the response of the root system architecture to phosphate starvation in *Arabidopsis* // *Plant Physiol.* 2005. V. 138. P. 2061–2074.  
<https://doi.org/10.1104/pp.105.060061>
30. *Yang J., Worley E., Udvardi M.* A NAP-AAO3 regulatory module promotes chlorophyll degradation via aba biosynthesis in *Arabidopsis* leaves // *Plant Cell.* 2014. V. 26. P. 4862–4874.  
<https://doi.org/10.1105/tpc.114.133769>
31. *Belimov A.A., Dodd I.C., Safronova V.I., Dumova V.A., Shaposhnikov A.I., Ladatko A.G., Davies W.J.* Abscisic acid metabolizing rhizobacteria decrease ABA concentrations in planta and alter plant growth // *Plant Physiol. Biochem.* 2014. V. 74. P. 84–91.  
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2013.10.032>
32. *Pizzeghello D., Francioso O., Ertani A., Muscolo A., Nardi S.* Isopentenyladenosine and cytokinin-like activity of different humic substances // *J. Geochem. Explor.* 2013. V. 129. P. 70–75.
33. *Hönig M., Plihalova L., Husičkova A., Nisler J., Doležal K.* Role of cytokinins in senescence, antioxidant defence and photosynthesis // *Inter. J. Mol. Sci.* 2018. V. 19. P. 4045.  
<https://doi.org/10.3390/ijms19124045>
34. *Korobova A.V., Akhiyarova G.R., Veselov S.Y., Kudoyarova G.R., Fedyaev V.V., Farkhutdinov R.G.* Participation of nitrate sensor NRT1.1 in the control of cytokinin level and root elongation under normal conditions and nitrogen deficit // *Mosc. Univ. Biol. Sci. Bull.* 2019. V. 74. P. 221–226.  
<https://doi.org/10.3103/S0096392519040072>
35. *Werner T., Nehnevajova E., Köllmer I., Novak O., Strnad M., Krämer U., Schmölling T.* Root-specific re-

- duction of cytokinin causes enhanced root growth, drought tolerance, and leaf mineral enrichment in *Arabidopsis* and *Tobacco* // *Plant Cell*. 2010. V. 22. P. 3905–3920.  
<https://doi.org/10.1105/tpc.109.072694>
36. Liu S., Strauss S., Adibi M., Mosca G., Yoshida S., Ioio R.D., Runions A., Andersen T.G., Grossmann G., Huijser P., Smith R.S., Tsiantis M. Cytokinin promotes growth cessation in the *Arabidopsis* root // *Curr. Biol*. 2022. V. 32. P. 1974–1985.  
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2022.03.019>
37. Jones B.J., Ljung K. Auxin and cytokinin regulate each other's levels via a metabolic feedback loop // *Plant Signal. Behav*. 2011. V. 6. P. 901–904.  
<https://doi.org/10.4161/psb.6.6.15323>

## Combined Effect of PGPR Strains *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D and Humic Substances on the Growth, Content of Photosynthetic Pigments and Phytohormones in Wheat Plants in Drought Conditions

A. V. Feoktistova<sup>a,#</sup>, M. D. Timergalin<sup>a</sup>, T. V. Rameev<sup>a</sup>, and S. P. Chetverikov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Ufa Institute of biology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of the RAS  
 pr. Oktyabrya 69, Ufa 450054, Russia

<sup>#</sup>E-mail: feoktistova.arisha@yandex.ru

The aim of the study was to study the effect of bacteria that stimulate plant growth and humic substances on the content of chlorophyll, nitrogen balance index, cytokinin concentration, abscisic acid in wheat plants grown in drought conditions. The accumulation of the raw mass of wheat plants during treatment with a strain of *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D bacteria and humic substances with a deficiency of soil moisture is shown. Stimulation of plant growth is associated with the activation of root growth, which led to an increase in the nitrogen balance index and chlorophyll concentration in the treated plants. The detected increase in the concentration of chlorophyll in plants treated with *P. plecoglossicida* 2,4-D correlated with a decrease in the content of abscisic acid in shoots, and in plants treated with humates – with an increase in cytokinins in shoots. A higher efficiency of plant treatment with a combination of bacteria and humic substances than any of them individually may be associated with the additive effect of these treatments on hormonal balance.

**Keywords:** *Pseudomonas plecoglossicida* 2,4-D, wheat, drought, phytohormones.

УДК 632.95

## ДИНАМИКА ПРИМЕНЕНИЯ ПЕСТИЦИДОВ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

© 2023 г. В. В. Михайликова<sup>1,\*</sup>, Н. С. Стребкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений  
396030 п. ВНИИСС, Воронежская обл., Рамонский р-н, Россия

\*E-mail: vniizr\_director@mail.ru

Поступила в редакцию 06.03.2023 г.

После доработки 19.04.2023 г.

Принята к публикации 14.06.2023 г.

Представлены данные использования пестицидов различных классов опасности и применения препаратов разных химических классов и действующих веществ с 1990 по 2021 г.

**Ключевые слова:** пестициды, объем применения, классы опасности для человека, действующее вещество.

**DOI:** 10.31857/S0002188123090089, **EDN:** VYIKSQ

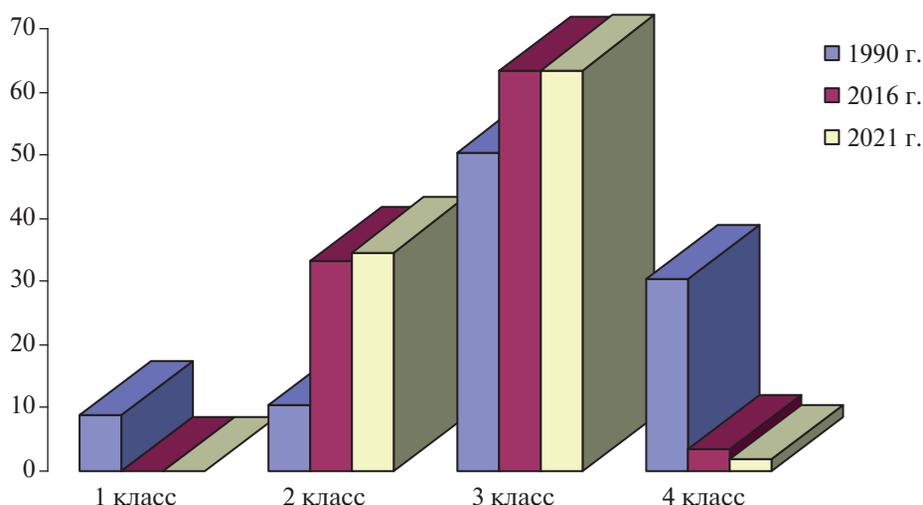
Лабораторией экономики ВНИИЗР проведен анализ статистических данных Министерства сельского хозяйства и Россельхозцентра о фактическом использовании средств защиты растений в Российской Федерации [1]. В работе представлены данные использования пестицидов различных классов опасности и применения препаратов разных химических классов и действующих веществ [2, 3].

Сравнительная динамика применения средств защиты растений различных классов опасности за 39 лет указывает на то, что применение токсичных веществ значительно сократилось. Применение пестицидов 1-го класса опасности в 1990 г. составило 10.93 тыс. т (8.8%), а с 2016 по 2021 г. остался на уровне 20.0 т (0.03%). Препараты 1-го класса опасности использовали только в группе фумигантов и родентицидов (Дакфосал, Магтоксин, Фоском, Фосфин, Фумифос), инсектицид Хинуфур применяли от амбарных вредителей и болезней и для обработки семян. Вместе с этим увеличилось применение инсектицидов и фунгицидов 2-го класса опасности, их показатели возросли в 2 раза против 1990 г. и составили в 2021 г. 24.06 тыс. т или 34.6% (рис. 1).

Среди инсектицидов наиболее применяемыми были препараты Брейк, Видат 5 Г, Гарпун, Каратошанс, Органза, Фаскорд, Фастак, фунгицидов и протравителей – препараты Амистар Экстра, Зим 500, Колосаль Про, Рекс Дуо, Фалькон, Бенефис, Виал ТрасТ, Инпут, Иншур Перформ,

Максим Форте, Селест Макс и Селест Топ, гербицидов – препараты Айкон, Аминка Фло, Ассолюта, Балерина, Дротик, Октапон Экстра, Прима, Пропонит. Объем использования препаратов 3-го класса опасности увеличился на 13% и составил 44.10 тыс. т – 63.5%. Наиболее используемыми были инсектициды – препараты Борей, Имидор, Карате Зеон, Кинфос, Препарат 30 Плюс, Эсперо, в группе фунгицидов и протравителей – препараты Абакус Ультра, Альто супер, Иншур Перформ, Кинто Дуо, Максим, Максим Плюс, Оптимо, Рекс Плюс, Дивиденд Суприм, Дивиденд Экстрим, ТМТД и гербицидов – препараты Базагран, Бицепс-Гарант, Бетанал 22, Глидер, Торнадо, Торнадо 500, Рап, Ураган Форте. К самым безопасным веществам относят 4-й класс опасности, это биопрепараты и биологические регуляторы роста растений. Объем их применения значительно снизился в период реформ, и до настоящего времени составляет 1.27–2.00 тыс. т. Наиболее используемыми биопрепаратами были Бактороденцид, Алирин-Б, Ж, БФТИМ КС-2, Псевдобактерин 2-Ж, Фитоспорин-М, Ж. Среди химических и биологических регуляторов роста растений использовали препараты Агат-25 Супер, Биодукс, Вигор Форте, Зеребра Агро, Энергия-М.

Существенную роль в защите растений от вредителей играют энтомофаги. До 1990 г. их разведение было налажено во всех регионах, энтомофаги успешно применяли в посевах основных сельскохозяйственных культур. Поэтому в по-



**Рис. 1.** Объем применения пестицидов различных классов опасности в 1990–2021 гг., % к общему объему использования.

следние годы производство полезных энтомофагов в филиалах учреждения расширяется – растут объемы производства и ассортимент. В 2021 г. объем производства энтомофагов (трихограммы, габробракона, златоглазки, фитосейулюса и др.) в филиалах Россельхозцентра составил 16.95 млрд шт. В связи с принятием закона “Об органической продукции” увеличивается применение биологических препаратов и восстанавливаются фабрики по производству биофагов.

В 2012 г. было израсходовано 53.61 тыс. т средств защиты растений, в 2016 г. – 62.20, в 2021 г. – 69.45 тыс. т. С увеличением применения средств защиты растений растет разнообразие препаратов пестицидов за счет химического строения действующих веществ (д.в.). Проведенные расчеты фактического использования химических средств защиты растений с учетом д.в. показали, что в 2012 г. общий объем применения составил 191.19 тыс т, в 2016 г. – 20.53, в 2021 г. – 22.83 тыс. т. В 2012 г. использовали 203 наименования д.в. пестицидов, на их основе было применено 125 комбинированных препаратов, а к 2021 г. было использовано 238 наименований. Применение комбинированных препаратов увеличилось более чем в 2 раза – до 292 наименований. Среднее содержание примененных д.в. в группе инсектицидов составило 30.6, фунгицидов и протравителей – 31.1, гербицидов и десикантов – 36.0%. Комбинированные препараты к 2021 г. составили в группе инсектицидов и гербицидов 32, в группе фунгицидов и протравителей – 74%.

В соответствие с объемом использования в 2012 г. наибольшая пестицидная нагрузка (по д.в.)

в группе гербицидов составила 0.116, минимальная – 0.017 в группе инсектицидов, 0.033 – фунгицидов и протравителей, в общем объеме – 0.166 кг/га пашни. В 2021 г. гербицидная нагрузка составила 0.132, инсектицидная – 0.018, фунгицидная – 0.045 кг/га.

Анализ применения основных групп пестицидов проведен согласно классификации по химическому строению действующих веществ [4].

Основные действующие вещества инсектицидов составили 5 классов: в 2012 г. фосфорорганические соединения составили 55.2%, к 2021 г. их количество снизилось в 2 раза, минеральные масла с 15.7 уменьшились до 12.0%, неоникотиноиды с 13.1 увеличились до 46.4%, синтетические пиретроиды с 12.3 увеличились до 14.4%. Производные карбаминовой кислоты практически не используются, на их смену приходят менее токсичные препараты (табл. 1).

Наиболее востребованными из фосфорорганических соединений были: диметоат (препараты Би-58 Топ, Данадим Эксперт, Рогор-С), малатион (Алиот) и диазинон (Диазинон Экспресс, Диазол), хлорпирифос (Сайрен, Тайра). Минеральные масла представлены вазелиновым маслом. Из неоникотиноидов наиболее востребованными были имидаклоприд (Имидашанс С, Иמידор Про, Пикус, Табу) и тиаметоксам (Актара, Инстиво, Кайзер, Тиара, Харита). Из синтетических пиретроидов максимально использовали альфа-циперметрин (Айвенго, Цунами), циперметрин (Шарпей, Арриво) и лямбда-цигалотрин (Каратэ Зеон, Лямбда-С, Брейк). К наиболее используемым комбинированным препаратам относятся

смеси диметоата и бета-циперметрина (Кинфос), лямбда-цигалотрин + тиаметоксам (Декстер, Эфория), имидаклоприд + альфа-циперметрин (Эсперо), имидаклоприд + пенцикурон (Престиж). В группе инсектицидов использовали 33 наименования 2-компонентных и 3 наименования 3-компонентных соединений – альфа-циперметрин + имидаклоприд + клотианидин (Борей Нео), бифентрин + тиаметоксам + альфа-циперметрин (Беретта), тиаметоксам + имидаклоприд + фипронил (Бомбарда).

Фунгициды и протравители представляют 12 классов основных химических соединений (табл. 2). Наибольшую группу составили азолы, в 2012 г. их доля составила 31.7, в 2021 г. – 49%. Более востребованными были д.в. пропиконазол, тебуконазол (препараты Титул 390, Пропишанс, Колосаль Про, Колор, Фоликур, Страйк Форте, Алькор) и эпоксиконазол (Рекс Плюс). Доля бензимидазолов составила 11.7%, из них применяли карбендазим (Кредо, Зим 500), беномил (Бенорад) и тиофанат-метил (Феникс Дуо, Топсин-М). Из неорганических веществ использовали серу – 3.1% (препараты Кумулус, Тиовит Джет). Применение производных дитиокарбаминовой кислоты снизилось в 2 раза, наиболее распространенными были манкоцеб (Дитан, Манкоцеб, Пенкоцеб) и тирам (ТМТД). Соединения меди представляют хлорокись и сульфат меди, объем применения которых снизился в 3 раза. Применение стробилуринов увеличилось до 8.1% (препараты Квадрис, Строби, Зато, Пиктор), большая часть представлена комбинированными препаратами. Применение фталимидов (0.5%) снизилось в 2 раза (д.в. – каптан (препарат (Мерпан)), хлорнитрилов (0.3%) – в 3 раза (д.в. – хлороталонил (препарат Браво)). К морфолинам относятся спирокарсамин (в смеси – Фалькон) и диметоморф (Акробат Топ, Акробат МЦ), доля которых составила 3.8%. Применение фенипирролов увеличилось в 2 раза (д.в. – флудиоксонил (препарат Геокс)).

Комбинированные смеси состоят из 97-ми наименований двухкомпонентных, 34-х – трехкомпонентных, 1-го – четырехкомпонентного. Наиболее востребованы комбинированные смеси: азоксистробин + ципроконазол (Амистар Экстра), пропиконазол + ципроконазол (Альто Супер), спирокарсамин + тебуконазол + протиоконазол (Солигор), спирокарсамин + тебуконазол + триадименол (Фалькон), меди хлорокись + цимоксанил (Ордан). Инсектофунгициды представлены в смесях: клотианидин + флуоксастробин + протиоконазол + тебуконазол (Сценик Комби), тиаметоксам + седаксан + флудиоксонил + тебуко-

**Таблица 1.** Объем применения инсектицидов в зависимости от химического строения действующих веществ, % к общему объему д.в.

2012 г.	2016 г.	2021 г.
Фосфорорганические соединения		
55.2	36.7	24.0
Производные карбаминовой кислоты		
0.5	0.7	0.05
Синтетические пиретроиды		
12.3	14.5	14.4
Неоникотиноиды		
13.1	30.0	46.4
Минеральные масла		
15.7	14.4	11.6
В том числе комбинированные		
9.6	20.8	32.1
Итого в РФ, т		
2014.40	1880.09	2062.82
Инсектицидная нагрузка, кг/га пашни		
0.017	0.015	0.018

назол (Вайбранс Интеграл), тиаметоксам + флудиоксонил + тебуконазол (Селест Макс).

Группу гербицидов, десикантов и дефолиантов составили основные 15 классов, которые относятся к 2–3 классу опасности (табл. 3). К 2021 г. производные фосфоновой кислоты (глифосаты) были наиболее востребованы и достигли 1/3 части объема применения гербицидов – 33.1%. Их представляют более 50-ти наименований препаратов (Торнадо, Спрут Экстра, Кайман, Ураган Форте, Спрут Экстра, Голиаф, ГлиБест). Производные хлорфеноксисукусной кислоты (19.8%) представлены 2,4-Д (соли и эфиры) (препараты Ассольюта, Балерина, Айкон, Балет, Примадонна, Аминка), МЦПА (соли) – (Агритокс, Гербитокс). Доля производных арилоксифеноксипропионовой кислоты составила 3.2% (препараты Ластик Топ, Овсяген Экспресс, Пума Супер 100, АРГО). К производным пиколиновой кислоты относится клопиралид, доля его расхода была равна 1.0% (препараты Агрон, Лорнет, Лонтрел-300, Хакер). Циклогександионы представлены клетодимом, его расход составил 1.2% (Квикстеп, Лигат). Доля производных сульфонилмочевины составила 3.5%, среди них максимально использовали трибенурон-метил (препараты Вояж, Гранат, Мортира), трифлурсульфурон-метил (Карибу, КариМакс-Флюид, Карнаби, Трицепс). Доля д.в. из класса триазинов составляла 9.5% (препараты Пилот, Голтикс, Скрин, Зенкор Ультра, Лазурит,

**Таблица 2.** Объем применения фунгицидов и протравителей в зависимости от химического строения действующих веществ, % к общему объему д.в.

2012 г.	2016 г.	2021 г.
	Азолы	
31.7	41.0	49.0
	Бензимидазолы	
17.9	15.6	11.7
	Карбаматы	
–	2.0	1.7
	Морфолины	
3.8	7.3	9.5
	Неорганические вещества	
6.05	4.2	3.1
	Производные дитианонов	
0.6	0.60	0.25
	Производные дитиокарбаминовой кислоты	
19.1	13.0	8.1
	Соединения меди	
12.6	7.1	3.1
	Стробирурины, оксизолидиндионы	
1.3	3.2	8.1
	Фенипирролы	
–	0.4	0.9
	Фталимиды	
1.0	0.9	0.5
	Хлорнитрилы	
0.9	0.3	0.3
	В том числе комбинированные	
56.34	63.4	73.8
	Итого в РФ, т	
3669	4965	5290
	Фунгицидная нагрузка, кг/га пашни	
0.033	0.040	0.045
	Инсектофунгициды, т	
34.00	65.32	284.56

Сармат, Ферат). Доля д.в. из класса хлорацетомидов снизилась до 6.8%, основное д.в. – С-метолахлор (препараты Дуал Голд, Дифилайн, Симба, Гардо Голд, Камелот), за счет высокой токсичности действующее вещество – ацетохлор – сейчас не производят. К классу динитроанилины относятся диметенамид-Р, пендиметалин, (Фронтьер Оптима, Стомп Профессионал, Эстамп), их доля была равна 1.0%.

Класс производных фенилкарбаминовой кислоты представляют д.в. десмедифам и фенмеди-

**Таблица 3.** Объем применения гербицидов в зависимости от химического класса действующих веществ, % к общему объему д.в.

2012 г.	2016 г.	2021 г.
	Бензофуранилалкансульфонаты	
0.9	1.4	1.1
	Производные хлорфеноксисукусной кислоты	
17.2	20.5	19.8
	Производные арилоксифеноксипропионовой кислоты	
2.7	2.9	3.2
	Производные пиколиновой кислоты	
1.5	1.4	1.0
	Циклогександионы	
0.7	0.9	1.2
	Производные сульфонилмочевины	
2.8	3.3	3.5
	Триазины	
3.5	7.1	6.0
	Хлорацетомиды	
17.0	3.1	6.8
	Динитроанилины	
1.80	2.7	1.0
	Производные фенилкарбаминовой кислоты	
5.4	5.8	3.7
	Тиадиазины	
2.5	5.3	9.1
	Производные фосфоновой кислоты	
33.4	34.5	33.1
	Производные бензойной кислоты	
4.55	2.6	1.1
	Производные бипиридилия	
1.9	2.5	3.1
	Имидозолиноны	
0.3	0.3	0.2
	Прочие	
6.9	5.7	6.1
	В том числе, комбинированные	
20.6	26.0	32.0
	Итого в РФ	
13435.52	13689.07	15477.15
	Гербицидная нагрузка кг/га пашни	
0.116	0.112	0.132

фам, объем их применения – 3.7% (бетаналы, би-тап, бифор, бицепс 22). Тиадиазины представлены бентазоном, расход при их применении – 9.0% (препараты Базагран, Бентасил, Бизон, Корсар).

Препарат Дикамба относится к производным бензойной кислоты, доля ее расхода – 1.1% (препараты Банвел, Дианат, Мономакс, Адвокат). Бензофуранилалкансульфонаты представлены этофумезатом, доля его применения – 1.10%.

Группа комбинированных гербицидов включает 80 наименований двухкомпонентных, 24 – трехкомпонентных и 3 – четырехкомпонентных препаратов. Наиболее востребованы двухкомпонентные смеси 2,4-Д + дикамба (эфиры), 2,4-Д + флорасулам (Аминка, Балет, Элант Экстра), двухкомпонентные смеси бетанальной группы: (Бетанал 22, Бифор 22, Бицепс 22, Бицепс 300), трехкомпонентные препараты бетанальной группы: Этофумезат + десмедифам + фенмедифам (Бетанал Эксперт, Бетарен Супер, Бицепс Гарант, Бифор Прогресс). К четырехкомпонентным относятся препараты бетанальной группы этофумезат + десмедифам + фенмедифам + ленацил (Бетанал макс Про, Эксперт Квадро) и гербицид для обработки посевов кукурузы форамсульфурон + йодосульфурон-метил-натрий + тиенкарбазон-метил + антидот ципросульфамид (МайсТер Пауэр).

Несмотря на экономическую ситуацию последних лет в Российской Федерации рынок средств защиты растений остается востребованным, за последние 10 лет их применение увеличилось на 23%. Но за это время произошли некоторые изменения в производстве и применении пестицидов. Применение токсических препаратов

значительно сократилось, в основном применяются препараты 2–3-го класса опасности.

С увеличением объема применения средств защиты растений возросло разнообразие пестицидов в зависимости от химического строения действующих веществ. В последнее время применяются комбинированные пестициды, способные за одну обработку уничтожить комплекс вредных организмов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в целях снижения экономических затрат и соблюдения экологической безопасности рекомендуется использовать многокомпонентные препараты, баковые смеси пестицидов с регуляторами роста, биологически активными веществами и микроудобрениями, направленные на повышение иммунитета растений и борьбу с комплексом вредных объектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обзор фитосанитарного состояния посевов сельскохозяйственных культур в Российской Федерации в 2021 году и прогноз развития вредных объектов в 2022 году. М., 2021. 513 с.
2. Список пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. Справ. изд-е. М., 2021. 816 с.
3. Попов С.Я., Дорожкина Л.А., Калинин В.А. Основы химической защиты растений. М., 2003. 191 с.

## Dynamics of Pesticide Use in the Russian Federation

V. V. Mikhaylikova<sup>a,#</sup> and N. S. Strebkova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>All-Russian Scientific Research Institute of Plant Protection  
Voronezh Region, Ramonsky District, p. VNISS 396030, Russia

<sup>#</sup>E-mail vniizr\_director@mail.ru

Data on the use of pesticides by hazard classes and the use of drugs by chemical classes and active substances from 1990 to 2021 are presented.

*Keywords:* pesticides, scope of application, hazard classes for humans, active substance.

УДК 632.95:633.11“321”

## БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ БАКОВЫХ СМЕСЕЙ ПРЕПАРАТОВ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА КАЧЕСТВО ЗЕРНА

© 2023 г. В. Г. Доронин<sup>1</sup>, Е. Н. Ледовский<sup>1,\*</sup>, И. В. Пахотина<sup>1</sup>, Я. Ф. Молод<sup>1</sup><sup>1</sup>Омский аграрный научный центр  
просп. Королева, 26, Омск 644012, Россия

\*E-mail: 55asc@bk.ru

Поступила в редакцию 10.03.2023 г.

После доработки 07.04.2023 г.

Принята к публикации 14.06.2023 г.

В относительно благоприятные по увлажнению годы значительно возросли потери урожая зерна яровой пшеницы от грибных инфекций – бурой листовой и стеблевой ржавчин, мучнистой росы и пр., достигая 25–30% и более от валового сбора зерна. Цель исследования, проведенного в 2018–2021 гг. – совершенствование мер защиты от вредоносных листостеблевых болезней в условиях южной лесостепи Западной Сибири. Основные задачи: мониторинг фитосанитарной обстановки, изучение биологической эффективности химических фунгицидов, биопрепарата, регулятора роста и баковых смесей, в том числе с жидким комплексным удобрением, в посевах яровой мягкой пшеницы, определение влияния различных препаратов на урожайность и качество зерна. Исследование проведено в краткосрочных многовариантных полевых опытах. Площадь делянки 25 м<sup>2</sup>, повторность четырехкратная, размещение вариантов рендомизированное. Сравнение эффективности препаратов проведено с контролем – вариантом без защиты от болезней. Применение химических фунгицидов, баковых смесей их с удобрением, регулятором роста в посевах яровой пшеницы Омская 36 обеспечило высокий уровень биологической эффективности против листостеблевых болезней. Максимальные показатели эффективности против бурой листовой и стеблевой ржавчин получены при применении баковых смесей препаратов Солигор + Форсаж, Рекс Плюс + Лариксин и Титул Дуо + Форсаж (98.4–99.7%). Лучшие результаты защиты от мучнистой росы имели смеси препаратов Рекс Плюс + Форсаж и Солигор + Лариксин, соответственно 78.8 и 81.2%. Наибольшие прибавки урожайности зерна к контролю получены в вариантах применения препаратов Рекс Плюс + Лариксин и Титул Дуо + Форсаж, соответственно 1.80 и 1.89 т/га. Уровень хозяйственной эффективности в этом случае был больше 50%. Применение фунгицидов и баковых смесей существенно увеличивало массу и массу 1000 зерен. Отмечен рост содержания клейковины от 1.2 до 5.1% в вариантах с фиторегулятором Лариксин, белка – на 0.85–1.71%. В аналогичном по схеме полевом опыте с пшеницей сорта Мелодия, проведенном в неблагоприятных погодных условиях 2020 и 2021 гг., роста урожайности зерна от применения препаратов не получено. Основные причины – засушливая погода и соответственно низкая пораженность посева болезнями. Обработка Лариксином и его баковыми смесями с фунгицидами Титул Дуо, Рекс Плюс и Солигор существенно увеличила содержание белка в зерне на 0.80–1.50%, клейковины – до 2.0%. Полученные результаты свидетельствовали о высокой биологической и хозяйственной эффективности применения современных фунгицидов и баковых смесей с регулятором роста и удобрением в условиях высокой пораженности яровой пшеницы листостеблевыми болезнями.

**Ключевые слова:** яровая пшеница, болезни растений, фунгициды, регулятор роста, биопрепарат, баковые смеси, эффективность.

**DOI:** 10.31857/S0002188123090053, **EDN:** ZTARZU

### ВВЕДЕНИЕ

В Западной Сибири в благоприятные по увлажнению годы с высокой потенциальной урожайностью яровой пшеницы резко возрастают потери от листостеблевых инфекций, достигая 25–30% и более от валового сбора зерна. Значи-

тельным резервом роста производства качественного зерна может стать защита посевов от листостеблевых болезней. В регионе выявлены наиболее вредоносные грибные болезни: бурая листовая ржавчина (*Puccinia triticina* Eriks.), стеблевая (линейная) ржавчина (*Puccinia graminis* Rers.), мучнистая роса (*Erysiphe graminis* DC.) и

септориоз (*Septoria* ssp.). В пораженных посевах снижается урожайность культуры и ухудшается качество продукции, например, уменьшается содержание в зерне белка и клейковины, снижается стекловидность [1–5]. Использование фунгицидов в посевах яровой мягкой пшеницы в условиях юга Западной Сибири способствует увеличению производства зерна более высокого класса, с повышенным содержанием белка и клейковины [6]. В отдельные годы фунгицидная обработка обеспечивает увеличение урожайности с сохранением его качества на уровне контроля или с незначительным улучшением [7].

Значительным резервом повышения урожайности зерна яровой пшеницы в условиях Западной Сибири и повышения его качества может стать защита посевов от листостеблевых грибных инфекций. Наиболее действенным приемом для этого является своевременная обработка химическими фунгицидами. Существенный научно-практический интерес представляет изучение эффективности их совместного применения с регуляторами роста, предположительно повышающих иммунитет и стрессоустойчивость культуры, биопрепаратами и жидкими комплексными удобрениями (ЖКУ). Цель работы – изучение эффективности применения баковых смесей фунгицидов, регулятора роста и жидкого комплексного удобрения на урожайность и качество зерна яровой мягкой пшеницы.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в полевых опытах на полях Омского АНЦ, в посевах яровой пшеницы среднераннего сорта Омская 36 и среднеспелого сорта Мелодия [8] в севообороте: пар чистый–яровая пшеница–яровая пшеница–ячмень. Почва опытного участка – лугово-черноземная среднеспелая тяжелосуглинистая, содержание гумуса в пахотном слое – 6.4–6.6% (по Тюрину), подвижного фосфора и обменного калия – соответственно 105–128 и 350–420 мг/кг почвы (по Чирикову), рН<sub>KCl</sub> 6.4–6.7 ед. На момент посева содержание нитратного азота в почве было равно в 2018 г. – 18.2, в 2019 г. – 17.8, в 2020 г. – 15.1, в 2021 г. – 16.5 мг/кг почвы.

Основная обработка почвы – плоскорезная на 10–12 см. Агротехника возделывания пшеницы – зональная. Фоновое внесение удобрений не проводили. Площадь делянки в опыте – 25 м<sup>2</sup>, размещение вариантов – рендомизированное, повторность четырехкратная. В схему опыта были включены химические системные фунгициды Титул Дуо, Рекс Плюс, Солигор, биофунгицид Псевдо-

бактерин-3, регулятор роста Лариксин, жидкое комплексное удобрение (ЖКУ) Форсаж и баковые смеси этих препаратов [9]. Псевдобактерин-3 – биофунгицид, содержит живые клетки штамма *Pseudomonas aureofaciens*. Лариксин – иммуномодулятор и стимулятор роста на основе биофлавоноида дигидроокверцитина (50 г/л). Форсаж – жидкое комплексное минеральное удобрение, содержащее макро- и микроэлементы. Период применения – от начала колошения до начала цветения культуры. Внесение препаратов проводили ранцевыми опрыскивателями “PJ-18” с расходом рабочей жидкости 200 л/га. Методики фитопатологических наблюдений – общепринятые [10–12]. При учете листостеблевых болезней пшеницы определяли распространение и развитие инфекций. Развитие мучнистой росы (интенсивность поражения растений) – по шкале Гешеле, бурой ржавчины – Петерсона и др. Расчет проводили по формуле:  $R = \Sigma(a \times b) - N$ , где  $R$  – развитие болезни, %;  $\Sigma(a \times b)$  – сумма произведений числа больных растений ( $a$ ) на соответствующую долю пораженности в % ( $b$ );  $N$  – общее количество растений в пробах.

В работе приведены результаты определения степени развития и распространения преобладающих грибных инфекций яровой пшеницы через 20 сут после обработки препаратами. Учет урожая зерна – однофазная уборка комбайном “Сампо-130”. Обработку урожайных данных выполняли методом дисперсионного анализа [13] с использованием прикладных программ.

Погодные условия вегетационных периодов существенно различались. Май и июнь 2018 г. характеризовались повышенным количеством осадков. В целом условия года были благоприятными для развития листостеблевых болезней, особенно видов ржавчины пшеницы. В июне 2019 г. преобладала прохладная дождливая погода, осадков выпало 85 мм (167% нормы). Июль был теплым и засушливым. Условия вегетации оказались благоприятными для развития мучнистой росы, с начала колошения появилась бурая ржавчина, а позднее и линейная. В мае 2020 г. было жарко и сухо, температура воздуха превысила норму на 5.6°C, не было существенных осадков и в 1-й–2-й декадах июня. ГТК за июль составил 0.2, что свидетельствовало о сильной засушливости. Период вегетации оказался неблагоприятным для зерновых культур. Май 2021 г. характеризовался жаркой и сухой погодой с температурой воздуха выше нормы на 4.3°C. Существенные осадки выпали в конце 2-й–начале 3-й декады июня. Условия вегетации года, с периодами высоких температур

**Таблица 1.** Биологическая эффективность препаратов против листостебельных болезней яровой пшеницы сорта Омская 36 после пара (средняя за 2018–2019 гг.), %

Вариант	Мучнистая роса		Виды ржавчины	
	R	БЭ	R	БЭ
1. Контроль без обработки	17.0	—	76.0	—
2. Псевдобактерин-3	9.8	42.4	48.2	36.6
3. Лариксин	10.3	39.4	56.2	26.1
4. Титул Дуо	5.4	68.2	5.2	93.2
5. Титул Дуо + Форсаж	5.2	69.4	0.2	99.7
6. Титул Дуо + Лариксин	6.1	64.1	3.6	95.3
7. Рекс Плюс	8.4	50.6	8.0	89.5
8. Рекс Плюс + Форсаж	3.6	78.8	5.2	93.2
9. Рекс Плюс + Лариксин	5.6	67.1	1.0	98.7
10. Солигор	8.5	50.0	3.2	95.8
11. Солигор + Форсаж	7.2	57.6	1.2	98.4
12. Солигор + Лариксин	3.2	81.2	1.9	97.5

Примечание. R – развитие болезни, БЭ – биологическая эффективность. То же в табл. 3.

**Таблица 2.** Влияние обработки посева препаратами и баковыми смесями на урожайность зерна пшеницы Омская 36 после пара

Вариант	Норма расхода, л, кг/т	Урожайность зерна, т/га			Хозяйственная эффективность, %
		2018 г.	2019 г.	средняя	
1. Контроль	—	1.56	1.76	1.66	—
2. Псевдобактерин-3	0.1	2.39	1.78	2.08	20.2
3. Лариксин	0.03 + 0.03	2.14	1.88	2.01	17.4
4. Титул Дуо	0.32	2.50	2.96	2.73	39.2
5. Титул Дуо + Форсаж	0.32 + 1.0	3.36	3.74	3.55	53.2
6. Титул Дуо + Лариксин	0.32 + 0.03	2.54	2.76	2.65	37.4
7. Рекс Плюс	0.9	3.40	3.12	3.26	49.1
8. Рекс Плюс + Форсаж	0.9 + 1.0	3.49	2.96	3.22	48.4
9. Рекс Плюс + Лариксин	0.9 + 0.03	2.89	4.02	3.46	52.0
10. Солигор	0.5	3.20	3.34	3.27	49.2
11. Солигор + Форсаж	0.5 + 1.0	3.15	3.09	3.12	46.8
12. Солигор + Лариксин	0.5 + 0.03	2.98	2.90	2.94	43.5
<i>HCP</i> <sub>05</sub>		0.55	0.45		

воздуха и дефицита атмосферных осадков были неблагоприятными для зерновых культур.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В опыте с яровой пшеницей сорта Омская 36 после пара изучали влияние обработки посева химическими фунгицидами, биофунгицидом Псевдобактерин-3, регулятором роста Лариксин, ЖКУ Форсаж и их баковыми смесями на поражение листостеблевыми инфекциями, урожайность и качество зерна культуры. Основными болезнями в эти годы были виды ржавчины – буря листовая (*Puccinia triticina* Eriks.) и линейная (*Puccinia graminis* Rers.), в меньшей степени – мучнистая роса (*Erysiphe graminis* DC.). Средняя

за 2 года степень пораженности ржавчинами составила 76, мучнистой росой – 17%. Биологическая эффективность Псевдобактерина-3 против мучнистой росы была равна 42.4, ржавчины – 36.6% (табл. 1).

Низкий уровень эффективности получен и при применении Лариксина. Очень высокую биологическую эффективность против ржавчинных инфекций (от 89.5 до 99.7%) показали химические фунгициды, их баковые смеси с регулятором роста и ЖКУ. При этом прослежена тенденция к ее росту в вариантах с баковыми смесями. Наиболее высокий эффект защиты от мучнистой росы получен при применении смесей Рекс Плюс +

**Таблица 3.** Биологическая эффективность препаратов против листостебельных болезней яровой пшеницы сорта Мелодия после пара (средняя за 2020–2021 гг.), %

Вариант	Мучнистая роса		Виды ржавчин	
	R	БЭ	R	БЭ
1. Контроль без обработки	5.3	–	4.3	–
2. Псевдобактерин-3	3.0	43.4	5.6	0
3. Лариксин	4.5	15.1	3.2	25.6
4. Титул Дуо	1.0	81.1	0.2	95.4
5. Титул Дуо + Форсаж	1.0	81.1	0.3	93.0
6. Титул Дуо + Лариксин	0.7	86.8	0.2	95.4
7. Рекс Плюс	0.4	92.5	0.5	88.4
8. Рекс Плюс + Форсаж	0.6	88.7	0.0	100
9. Рекс Плюс + Лариксин	0.4	92.5	0.6	87.0
10. Солигор	0.6	88.7	0.2	95.4
11. Солигор + Форсаж	0.2	96.2	0.2	95.4
12. Солигор + Лариксин	0.6	88.7	0.2	95.4

**Таблица 4.** Влияние защиты от листостебельных болезней на урожайность зерна пшеницы сорта Мелодия после пара

Вариант	Норма расхода, л, кг/т	Урожайность зерна, т/га		
		2020 г.	2021 г.	средняя
1. Контроль без обработки	–	2.95	3.18	3.06
2. Псевдобактерин-3	0.1	2.86	2.96	2.91
3. Лариксин	0.03 + 0.03	2.82	2.90	2.86
4. Титул Дуо	0.32	2.78	3.11	2.94
5. Титул Дуо + Форсаж	0.32 + 1.0	3.17	3.26	3.22
6. Титул Дуо + Лариксин	0.32 + 0.03	2.50	3.16	2.83
7. Рекс Плюс	0.9	2.55	3.22	2.88
8. Рекс Плюс + Форсаж	0.9 + 1.0	2.80	3.16	2.98
9. Рекс Плюс + Лариксин	0.9 + 0.03	3.19	3.23	3.21
10. Солигор	0.5	2.74	3.18	2.96
11. Солигор + Форсаж	0.5 + 1.0	2.67	3.14	2.9
12. Солигор + Лариксин	0.5 + 0.03	3.00	3.12	3.06
<i>HCP</i> <sub>05</sub>		0.68	0.48	

+ Форсаж и Солигор + Лариксин, соответственно 78.8 и 81.2%.

Следствием высокого эффекта действия химических фунгицидов, а также баковых смесей их с ЖКУ и регулятором роста против болезней стало значительное увеличение урожайности зерна культуры. Наибольшие прибавки к контролю получены в вариантах применения Рекс Плюс + Лариксин и Титул Дуо + Форсаж, соответственно 1.80 и 1.89 т/га. Уровень хозяйственной эффективности в этом случае был больше 50% (табл. 2).

В условиях 2018 года достоверный рост урожайности получен при применении биопрепара-

та Псевдобактерин-3 и регулятора роста Лариксин, соответственно на 0.83 и 0.58 т/га по сравнению с контролем.

В последующие годы исследование было продолжено в посевах яровой пшеницы сорта Мелодия. Пораженность болезнями в контроле была очень низкой: мучнистой росой – 5.3, ржавчинами – 4.3%. Причины слабого развития инфекций – засушливые условия вегетационных периодов, особенно в 2021 г., а также способность сорта сдерживать развитие этих болезней (табл. 3).

Максимальную эффективность против мучнистой росы проявила баковая смесь Солигор +

Таблица 5. Качество зерна яровой пшеницы Омская 36 после пара

Вариант	Натура зерна, г/л	Масса 1000 зерен, г	Стекловидность, %	Клейковина		Белок, %
				%	упругость, ед. ИДК	
2018 г.						
1. Контроль без обработки	638	24.5	50	26.6	60	14.3
2. Псевдобактерин-3	680*	29.2*	50	27.5	63	14.0
3. Лариксин	665	27.0	52	27.0	62	14.2
4. Титул Дуо	717*	34.5*	53	31.7*	77	14.8*
5. Титул Дуо + Форсаж	725*	36.8*	51	31.1*	67	15.0
6. Титул Дуо + Лариксин	713*	35.6*	50	29.3*	58	14.4
7. Рекс Плюс	713*	38.7*	51	30.3*	67	14.9*
8. Рекс Плюс + Форсаж	733*	39.5*	51	30.5*	71	14.1
9. Рекс Плюс + Лариксин	735*	39.5*	53	30.6*	57	15.2*
10. Солигор	718*	37.9*	52	30.8*	65	14.4
11. Солигор + Форсаж	746*	38.2*	52	29.8*	67	14.8*
12. Солигор + Лариксин	718*	37.4*	51	30.8*	67	15.2*
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	28	4.6	—	1.5	—	0.4
2019 г.						
1. Контроль без обработки	704	28.3	50	25.5	56	12.20
2. Псевдобактерин-3	692	27.5	51	23.0	57	10.20
3. Лариксин	708	30.1	52	26.4	54	13.2*
4. Титул Дуо	740*	32.5*	50	25.8	54	12.0
5. Титул Дуо + Форсаж	733*	31.8*	50	24.4	53	11.0
6. Титул Дуо + Лариксин	737*	31.8*	49	26.7*	58	13.3*
7. Рекс Плюс	773*	37.2*	50	27.4*	57	13.9*
8. Рекс Плюс + Форсаж	767*	37.5*	50	25.4	59	12.4
9. Рекс Плюс + Лариксин	771*	37.6*	50	26.6*	61	13.2*
10. Солигор	738*	32.8*	49	23.9	58	11.2*
11. Солигор + Форсаж	731*	32.6*	50	26.3	57	11.9
12. Солигор + Лариксин	735*	32.5*	50	24.7	61	12.4
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	23	3.0	—	1.2	—	1.0

\*Достоверные данные. То же в табл. 6.

+ Форсаж (96.2%), от ржавчин — смесь Рекс Плюс + Форсаж (100%).

Достоверных различий урожайности зерна в опытных вариантах с контролем не выявлено. В условиях 2020 г., в отдельных вариантах отмечена тенденция к снижению урожайности. В этом случае было выявлено существенно преимущество варианта защиты баковой смесью Рекс Плюс + Лариксин перед смесью Титул Дуо + Лариксин (табл. 4).

В условиях 2018 г. натура зерна в вариантах опыта увеличивалась к контролю на 75–97 г/л, масса 1000 зерен — на 10.0–15.0 г. Максимальные показатели содержания белка отмечены в вариантах применения Рекс Плюс + Лариксин и Солигор + Лариксин, прибавка к контролю составила 0.85%. Содержание сырой клейковины увеличилось на 2.7–5.1% (табл. 5).

В 2019 г. фунгициды и баковые смеси также существенно увеличили натуру и массу 1000 зерен.

**Таблица 6.** Качество зерна яровой пшеницы сорта Мелодия после пара

Вариант	Натура зерна, г/л	Масса 1000 зерен, г	Стекловидность, %	Клейковина		Белок, %
				%	Упругость, ед. ИДК	
2020 г.						
1. Контроль без обработки	32.0	730	50	30.1	68	14.4
2. Псевдобактерин-3	32.7	730	50	29.9	71*	13.8
3. Лариксин	32.2	728	51	30.6	68	15.6*
4. Титул Дуо	32.0	725	51*	30.7	67	14.5
5. Титул Дуо + Форсаж	34.1*	730	52*	29.6	72*	14.2
6. Титул Дуо + Лариксин	31.1	718	50	31.0*	73*	15.4*
7. Рекс Плюс	30.4	731	50	31.6*	71*	15.7*
8. Рекс Плюс + Форсаж	30.4	722	50	30.6	71	14.81
9. Рекс Плюс + Лариксин	32.7*	734*	51*	32.1*	72*	15.9*
10. Солигор	31.8	726	50	30.0	71*	14.2
11. Солигор + Форсаж	31.2	726	51*	30.3	72*	14.5
12. Солигор + Лариксин	33.1*	734*	49	30.6	69	15.2*
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	0.7	3	0.5	0.5	1.2	0.5
2021 г.						
1. Контроль без обработки	726	29.8	52	37.8	84	18.8
3. Псевдобактерин-3	732*	31.2*	52	39.1*	86	18.8
3. Лариксин	728	31.4*	52	39.0*	86	18.9
4. Титул Дуо	734*	30.8	52	37.6	84	18.6
6. Титул Дуо + Форсаж	730*	31.4*	52	36.7	85	19.0*
6. Титул Дуо + Лариксин	738*	30.3*	52	37.8	83	18.6
7. Рекс Плюс	742*	30.8*	52	38.6*	87	18.7
9. Рекс Плюс + Форсаж	738*	32.8*	52	37.3	83	19.1*
9. Рекс плюс + Лариксин	736*	31.0*	52	37.7	87	18.7
10. Солигор	736*	32.2*	52	38.8*	86	19.2*
12. Солигор + Форсаж	730*	29.8	52	39.0*	89	19.2*
12. Солигор + Лариксин	738*	32.2*	53	37.0	83	19.2*
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	3	0.6	0.2	0.5	1	0.2

Менее значительно изменялось содержание клейковины, достоверный рост был только в вариантах обработки смесью Титул Дуо + Лариксин и Рекс Плюс, соответственно на 1.2 и 1.9%. В варианте применения Солигора отмечено даже снижение показателей.

Неоднозначно препараты повлияли и на содержание белка. Достоверный рост показателя произошел в вариантах обработки Лариксином, смесью Титул Дуо + Лариксин и Рекс Плюс, соответственно на 0.97, 1.19 и 1.71%, снижение показателя зафиксировано при применении Солигора

на 1.03%. Вероятно, на показатели качества негативно повлияло сильное полегание культуры из-за ливневых осадков со шквалистым ветром. Показатель ИДК (упругости клейковины) варьировал в пределах оптимальных величин (50–70 ед.), кроме повышения до 77 ед. в варианте применения Титул Дуо в 2018 г.

Исследованиями, проведенными в Липецкой обл., также подтверждено положительное влияние Лариксина на урожайность и качество зерна яровой пшеницы сорта Тризо. Обработка посевов баковой смесью с гербицидами повышала уро-

жайность зерна на 14,7, содержание белка – на 1,7, стекловидности – на 22% [14].

В условиях Амурской обл. обработка яровой пшеницы Лариксином в фазе выхода в трубку существенно увеличивала урожайность зерна на 19,9–21,5, содержание белка – на 0,4–0,6, сырой клейковины – на 2,5–3,2% [15].

В острозасушливых условиях 2020 г. в посевах среднеспелого сорта Мелодия не отмечено значительного влияния фунгицидов и баковых смесей на показатели натуры и массы 1000 зерен. Обработка рострегулятором Лариксин и его баковыми смесями с фунгицидами Титул Дуо, Рекс Плюс и Солигор существенно увеличила содержание белка в зерне на 0,80–1,5% (табл. 6).

### ВЫВОДЫ

1. Применение химических фунгицидов, их баковых смесей с регулятором роста Лариксин и ЖКУ Форсаж в посевах яровой пшеницы сорта Омская 36 обеспечило высокую биологическую эффективность против листостебельных инфекций. Снижение степени развития наиболее вредоносных болезней – бурой листовой и стеблевой ржавчин – варьировало от 89,5 до 99,7%. Максимальная эффективность обработок выявлена при применении баковых смесей Солигор + Форсаж, Рекс Плюс + Лариксин и “Титул Дуо + Форсаж.

2. Обработка химическими фунгицидами и баковыми смесями способствовали существенному росту урожайности зерна пшеницы Омская 36. Наибольшие прибавки к контролю получены при защите смесями Рекс Плюс + Лариксин и Титул Дуо + Форсаж, соответственно 1,8 и 1,89 т/га (в контроле – 1,66 т/га). В условиях 2018 г. достоверный рост урожайности был при обработке биофунгицидом Псевдобактерин-3 и регулятором роста Лариксин, соответственно 0,83 и 0,58 т/га.

3. Защита посевов пшеницы сорта Мелодия, проведенная в опыте по аналогичной схеме, не обеспечила роста урожайности зерна. Основные причины – неблагоприятные для болезней засушливые условия в 2020 и 2021 гг., а также особенность сорта сдерживать развитие инфекции.

4. Применение фунгицидов и баковых смесей во все годы исследования в большинстве опытных вариантов существенно увеличивало натуру и массу 1000 зерен. Показатель ИДК (упругости клейковины) в основном варьировал в пределах оптимальных величин (50–70 ед.). Применение биофлавоноида дигидрохверцитина (препарата Лариксин) обеспечило наибольший рост содержания клейковины на 1,2–5,1, белка – на 0,8–1,7%.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чулкина В.А., Коняева Н.М., Кузнецова Т.Т. Борьба с болезнями сельскохозяйственных культур в Сибири М.: Россельхозиздат, 1987. 253 с.
2. Миронова Г.В. Химическая защита яровой пшеницы от болезней // Интенсификация производства зерна в Западной Сибири: сб. научн. тр. Новосибирск: РАСХН, СО, 1992. С. 18–25.
3. Чумаков А.Е., Захарова Т.И. Вредоносность болезней сельскохозяйственных культур. М.: Агропромиздат, 1990. 208 с.
4. Тепляков Б.И., Теплякова О.И. Болезни яровой пшеницы в Западной Сибири // Защита и карантин раст. 2003. № 1. С. 7–18.
5. Доронин В.Г., Ледовский Е.Н., Кривошеева С.В. Эффективность препаратов при защите яровой мягкой пшеницы от листостеблевых болезней в южной лесостепи Западной Сибири // Земледелие. 2016. № 6. С. 6–12.
6. Юшкевич Л.В. Защита яровой пшеницы от болезней в системе интенсивных технологий ее возделывания, в лесостепной зоне Западной Сибири // Сб. научн. работ, посвящ. 170-летию Сибирской аграрной науки. Омск, 1998. Т. 1. Земледелие, животноводство, экономика. С. 123–131.
7. Колмаков Ю.В., Ледовский Е.Н., Пахотина И.В. Качество зерна пшеницы при защите посевов от болезней // Вестн. ОмГАУ. № 3. 2016. С. 9–11.
8. Сорты сельскохозяйственных культур селекции ГНУ СибНИИСХ / Под ред. Рутц Р.И. Омск: Вариант-Омск, 2013. 144 с.
9. Список пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. 2019 год. Справ. изд-е // Прилож. к журн. “Защита и карантин раст”. 2019. № 4. 580 с.
10. Пересыпкин В.Ф. Атлас болезней полевых культур. 2-е изд., испр. и доп. Киев: Урожай, 1987. 144 с.
11. Методические указания по государственным испытаниям фунгицидов, антибиотиков и протравителей семян сельскохозяйственных культур. М.: Госхимкомиссия, ВИЗР, 1985. 130 с.
12. Учет и выявление вредителей и болезней по методике ВНИИЗР. Воронеж, 1984. 276 с.
13. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). 4-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 1979. 416 с.
14. Белопухов С.Л., Шатилова Т.И., Гаврилова О.В., Витов И.С., Карпиленко Г.П. Фиторегулятор Лариксин и показатели качества зерновых культур // Докл. науки и техн. АПК. 2013. № 9. С. 34–35.
15. Рафальская О.М., Радикорская В.А., Тимошенко Э.В. Действие биопрепаратов на урожайность и качество зерна сортов яровой пшеницы // Дальневост. аграрн. вестн. 2010. № 1 (13). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/deystvie-biopreparatov-na-urozhaynost-i-kachestvo-zerna-sortov-yarovoypsheniity> (дата обращения: 09.02.2023).

## Biological Efficiency of Tank Mixtures of Preparations for the Protection of Spring Wheat and Their Effect on Grain Quality

V. G. Doronin<sup>a</sup>, E. N. Ledovskiy<sup>a,#</sup>, I. V. Pakhotina<sup>a</sup>, and Ya. F. Molod<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Omsk Agricultural Research Center  
prosp. Akademika Koroleva 26, Omsk 644012, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: 55asc@bk.ru*

In relatively favorable humidification years, the loss of spring wheat grain harvest from fungal infections – brown leaf and stem rust, powdery mildew, etc., has increased significantly, reaching 25–30% or more of the gross grain harvest. The purpose of the study conducted in 2018–2021 is to improve protection measures against harmful leaf–stem diseases in the conditions of the southern forest-steppe of Western Siberia. Main tasks: monitoring the phytosanitary situation, studying the biological effectiveness of chemical fungicides, biological preparations, growth regulator and tank mixtures, including with liquid complex fertilizer, in spring wheat crops, determining the effect of various preparations on grain yield and quality. The study was conducted in short-term multivariate field experiments. The plot area is 25 m<sup>2</sup>, the repetition is fourfold, the placement of options is randomized. The effectiveness of the drugs was compared with the control variant without protection from diseases. The use of chemical fungicides, tank mixtures of them with fertilizer, growth regulator in the sowing of spring wheat Omsk 36 provided a high level of biological effectiveness against leaf-stem diseases. The maximum efficiency indicators against brown leaf and stem rust were obtained with the use of tank mixtures of the drugs Soligor + Fast and Furious, Rex Plus + Larixin and Title Duo + Fast and Furious (98.4–99.7%). The best results of protection against powdery mildew were mixtures of drugs Rex Plus + Fast and Furious and Soligor + Larixin, respectively 78.8 and 81.2%. The greatest increases in grain yield to control were obtained in the variants of the use of the drugs Rex Plus + Larixin and Title Duo + Fast and Furious, respectively 1.80 and 1.89 t/ha. The level of economic efficiency in this case was more than 50%. The use of fungicides and tank mixtures significantly increased the nature and weight of 1000 grains. There was an increase in the gluten content from 1.2 to 5.1% in variants with the phyto regulator Larixin, protein – by 0.85–1.71%. In a field experiment similar to the scheme with Melody wheat, conducted in adverse weather conditions in 2020 and 2021, grain yield growth from the use of drugs was not obtained. The main reasons are the dry weather and, accordingly, the low incidence of diseases in the crop. Treatment with Larixin and its tank mixtures with Title Duo, Rex Plus and Soligor fungicides significantly increased the protein content in the grain by 0.80–1.50%, gluten – up to 2.0%. The obtained results testified to the high biological and economic efficiency of the use of modern fungicides and tank mixtures with a growth regulator and fertilizer in conditions of high infestation of spring wheat with leaf–stem diseases.

*Keywords:* spring wheat, plant diseases, fungicides, growth regulator, biological product, tank mixtures, efficiency

УДК 631.89:632.122:631.445.41

## СОДЕРЖАНИЕ ТОКСИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ВНЕСЕНИИ ФОСФОГИПСА И ПОМЕТА В АГРОЧЕРНОЗЕМ СЛАБОЭРОДИРОВАННЫЙ

© 2023 г. И. М. Габбасова<sup>1</sup>, Т. Т. Гарипов<sup>1</sup>, М. А. Комиссаров<sup>1,\*</sup>, О. А. Мелентьева<sup>1</sup><sup>1</sup> Уфимский Институт биологии УФИЦ РАН  
450054 Уфа, просп. Октября, 69, Россия

\*E-mail: mkomissarov@mail.ru

Поступила в редакцию 02.02.2023 г.

После доработки 06.03.2023 г.

Принята к публикации 15.04.2023 г.

При использовании побочных продуктов и отходов промышленного и сельскохозяйственного производства (фосфогипса (ФГ) и индюшиного помета (ИП)) в качестве удобрения необходимо учитывать не только содержание питательных веществ, но и экологическую безопасность, в том числе наличие токсичных элементов. Мелкоделяночный полевой опыт был заложен на слабоэродированном агрочерноземе в лесостепной зоне Башкирского Предуралья. ФГ вносили однократно в дозах 5, 10 и 20 т/га, ИП – в дозах 40 и 60 т/га, органо-минеральное удобрение (ОМУ) – 40 и 60 т/га при соотношениях ФГ : ИП = 1 : 10, 1 : 5 и 1 : 2. При внесении в почву ФГ, ИП или ОМУ на уровне следов оставалось содержание As, Cd, Hg, Se, Mo, Sb, W и V. Практически не изменилось по сравнению с контрольным вариантом содержание Zn, Ni, Cu, Ba и Mn, содержание которых в почве было значительно больше, чем в исходном ФГ. Содержание Pb и Sr возрастало в основном при добавлении высоких доз ФГ, а Co и Cr – при больших дозах ИП. В целом содержание элементов 3-х классов токсичности не превышало ПДК, суммарный эффект загрязнения оценивался как допустимый.

**Ключевые слова:** агрочернозем, фосфогипс, птичий помет, токсичные элементы, суммарный эффект загрязнения.

**DOI:** 10.31857/S0002188123070050, **EDN:** OFUCYE

### ВВЕДЕНИЕ

Рациональное использование природных ресурсов остается актуальной проблемой для всего мира. Одним из аспектов, способствующих ее решению, является использование побочных продуктов и отходов промышленного и сельскохозяйственного производства, содержащих элементы минерального питания растений. При этом необходимо учитывать не только содержание питательных веществ, но и экологическую безопасность, одним из основных критериев которой является наличие токсичных элементов.

Отход производства фосфорной кислоты – фосфогипс (ФГ) – с одной стороны может быть использован как мелиорант и удобрение, с другой стороны, содержит в своем составе множество примесей, в том числе и токсические элементы. По данным авторов [1–3], в глобальном масштабе при производстве минеральных удобрений ежегодно образуется 100–280 млн т ФГ (в России – >15 млн т). При этом ФГ в отвалах накапливается десятилетиями [4], занимая большие площади и

загрязняя окружающую среду. В этой связи существует проблема его утилизации и рационального использования. Чаще всего ФГ используют для мелиорации солонцеватых и засоленных почв [5–10].

На практике ФГ во многих странах вносят в почву, как правило, вместе с углеродсодержащими отходами агропромышленного комплекса, такими как навоз, помет, различные растительные остатки [1, 11–14]. В Южно-Уральском регионе на сегодняшний день объем ФГ в отвалах составляет >10 млн т, на птицефабриках ежегодно образуются тысячи тонн помета и существует проблема их утилизации [15, 16]. В этой связи цель работы – изучение содержания токсичных элементов при внесении в слабоэродированный агрочернозем ФГ, индюшиного помета (ИП) и органо-минерального удобрения (ОМУ) на их основе.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на экспериментальных полях Водно-балансовой станции (54°50'23" с.ш.,

**Таблица 1.** Суммарный показатель загрязнения в зависимости от класса опасности

№	Вариант	Сокращение	$Z_c$		
			I	II	III
1	Контроль	К	—	—	—
2	ФГ 5 т/га	ФГ-5	0.8	0.8	1.0
3	ФГ 10 т/га	ФГ-10	1.0	1.0	1.3
4	ФГ 20 т/га	ФГ-20	1.6	1.3	1.5
5	ФГ 3.6 т/га + ИП 36.3 т/га	ОМУ-40 (1:10)	1.0	1.8	1.1
6	ФГ 5.5 т/га + ИП 54.5 т/га	ОМУ-60 (1:10)	1.3	2.8	1.3
7	ФГ 6.7 т/га + ИП 33.3 т/га	ОМУ-40 (1:5)	1.4	1.1	1.1
8	ФГ 10 т/га + ИП 50 т/га	ОМУ-60 (1:5)	1.9	2.5	1.6
9	ФГ 13.3 т/га + ИП 26.7 т/га	ОМУ-40 (1:2)	1.2	1.0	1.3
10	ФГ 20 т/га + ИП 40 т/га	ОМУ-60 (1:2)	1.9	1.7	2.0
11	ИП 40 т/га	ИП-40	1.0	1.7	0.9
12	ИП 60 т/га	ИП-60	1.2	2.9	1.0

55°44'55" в.д., 170 м н.у.м.; Уфимский р-н, Республика Башкортостан). По природно-климатическому районированию участок относится к лесостепной зоне Южного Предуралья, с достаточно влажным, умеренно континентальным климатом (Dfb в соответствии с классификацией климата Кеппена–Гейгера [17]). Среднегодовая температура воздуха в районе исследования составляла 3.8°C, осадков за год выпадало ~600 мм (2/3 из них – в летний период). Почва опытного участка представлена агрочерноземом глинисто-иллювиальным средневывщелоченным легкоглинистым слабоэродированным (Luvic Chernozem (Clayic, Aric, Pachic)). Эти почвы характеризуются средней мощностью гумусово-аккумулятивных горизонтов (AU + AUB = 60 см), средней гумусированностью, слабокислой реакцией среды.

Весной 2015 г. на вспаханном поле была сформирована серия экспериментальных делянок площадью 6 м<sup>2</sup> (2 × 3 м), а также произведен сбор компонентов для производства ОМУ. В частности, ФГ был взят из отвалов Мелеузовского завода по производству минеральных удобрений, ИП – с Мелеузовской птицефабрики, который перед внесением обрабатывали биопрепаратом “Биосептинол” для нейтрализации патогенной микрофлоры. На делянки ФГ был внесен в дозах 5, 10 и 20 т/га, ИП – 40 и 60 т/га. Дозы ОМУ составили также 40 и 60 т/га при соотношениях ФГ : ИП = 1 : 10, 1 : 5 и 1 : 2 (все удобрения вносили однократно, повторность опыта – трехкратная). Варианты опыта представлены в табл. 1. Для равномерного размешивания удобрений в почве делянки были повторно вспаханы на глубину 20 см, и был посажен картофель сорта “Снегирь”. В нача-

ле сентября были отобраны почвенные образцы из слоя 0–20 см, а также клубни картофеля для оценки влияния удобрений на их экологическое состояние. Метеорологические условия вегетационного периода соответствовали среднесезонным показателям, с достаточным уровнем влагообеспеченности (гидротермический коэффициент Селянинова составил 1.01).

Содержание элементов в почве определяли рентгенофлуоресцентным методом с помощью прибора “S1 Titan portable X-ray fluorescence analyzer” (Bruker Optics, США). Элементы в составе ФГ определяли масс-спектральным и атомно-эмиссионным методами по методике НСАМ № 499-АЭС/МС с помощью соответственно масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой “Elan-6100” (Perkin Elmer, США) и атомно-эмиссионного с индуктивно-связанной плазмой спектрометра “Optima-4300 DV” (Perkin Elmer, США). Содержание Cd и Pb в клубнях картофеля определяли атомно-адсорбционным методом с использованием анализатора “Spectrum-5-4” (Союзинвестметавтоматика, Россия).

Суммарный показатель загрязнения для каждого класса опасности (табл. 1) рассчитывали по формуле:

$$Z_c = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_{\text{фон}}} - (n-1),$$

где  $Z_c$  – суммарный показатель загрязнения,  $C_i$  – фактическое содержание элемента,  $C_{\text{фон}}$  – геохимический фон,  $n$  – число, равное количеству элементов, входящих в геохимическую ассоциацию. В качестве фона использовали концентрации

элементов в варианте без внесения удобрений (контроле).

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Состав ФГ в значительной степени определял поступление в почву содержащихся в нем элементов. В пересчете на оксиды он состоял в основном из  $\text{SO}_3$  – 54.12 и  $\text{CaO}$  – 35.90%, а также  $\text{P}_2\text{O}_5$  – 3.05%,  $\text{SrO}$  – 1.74%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 0.09%,  $\text{TiO}_2$  – 0.08,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  по – 0.05%,  $\text{K}_2\text{O}$  – 0.04%. Кроме этого, в составе ФГ обнаружены в качестве примесей Li, Be, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Se, Rb, Y, Zr, Nb, Mo, Rh, Pd, Ag, Cd, Sn, Sb, Te, Cs, Mg, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Ir, Pt, Au, Tl, Pb, Bi, Th, U. Большинство этих элементов было также выявлено в почве опытного участка в незначительных количествах.

Одним из основных критериев экологической безопасности внесенных в почву удобрений (ФГ, ИП или ОМУ) является содержание в них токсичных элементов 1-, 2- и 3-го классов опасности. Анализ данных содержания элементов 1-го класса показал (рис. 1), что при внесении в почву ФГ и ИП в разных дозах и сочетаниях были обнаружены следы As, Cd, Hg и Se. Содержание Zn в почве опыта составляло 50–60 мг/кг и осталось на этом уровне независимо от внесения ФГ. В условиях многолетнего опыта на черноземе обыкновенном с аналогичным содержанием Zn также отсутствовало загрязнение этим элементом при длительном применении ФГ и минеральных удобрений [18]. В отличие от других токсичных элементов 1-го класса опасности, содержание Pb при внесении повышенных доз ФГ (ФГ20, ОМУ60 при соотношении 1 : 5 и 1 : 2) возрастало, но оставалось меньше ПДК. При этом загрязнение почвы по величине суммарного показателя ( $Z_c$ ) в удобренных вариантах опыта относилось к категории допустимое. Близкие результаты были получены при внесении ФГ 20 т/га в черноземе обыкновенный [19]. Следует отметить, что в клубнях картофеля содержание элементов 1-го класса опасности (Cd и Pb) в первый год после внесения удобрений было значительно меньше ПДК [20].

По содержанию элементов 2-го класса токсичности и их суммарному показателю загрязнения отмечена несколько большая дифференциация в вариантах опыта (рис. 2). Тогда как количество Mo и Sb составляло следы, а Ni и Cu – находилось на уровне контроля, содержания Co и Cr заметно увеличивалось, особенно при повышенных дозах внесения ОМУ. Наиболее существенный вклад в

суммарный показатель загрязнения вносил Cr. Следует отметить, что для Южного Предуралья характерно повышенное содержание Cr в почвах [21], обусловленное его высокой концентрацией в материнских и горных породах, которая в осадочных, ультраосновных и основных горных породах может достигать 1200–3400 мг/кг. В черноземах этого региона его количество доходит до 288 мг/кг, в то время как в ФГ из отвалов Мелеузовского завода минеральных удобрений содержалось лишь ~6 мг Cr/кг. Поэтому вклад ИП по сравнению с ФГ в содержание хрома в почве опыта было несколько больше. Самые высокие показатели  $Z_c$  (2.5–2.9) отмечены при внесении повышенных доз ИП. Его влияние также было заметно в накоплении Co в почве. В целом содержание токсичных элементов 2-го класса опасности относилось к допустимому уровню.

Среди токсичных элементов 3-го класса опасности концентрация W и V в почве была на уровне следов. Содержание Ba в ФГ составляло порядка 100 мг/кг, что в несколько раз меньше, чем в почве опыта (рис. 3). Для черноземов региона в целом характерно содержание Ba в диапазоне 300–400, в отдельных случаях оно достигает 800 мг/кг [22]. Содержание Mn в ФГ составило 20 мг/кг, что в десятки раз меньше, чем в почве. Вследствие такого незначительного содержания этих элементов в удобрениях по сравнению с почвой существенных различий в вариантах опыта не наблюдали.

Важным показателем экологической безопасности внесения ФГ в качестве удобрения является содержание Sr [23], т.к. его ионы способны замещать кальций в тканях живых организмов, при этом опасным считается содержание этого элемента в почве >600 мг/кг [24]. В отличие от других элементов 3-го класса опасности, в ФГ содержится очень много Sr (14700 мг/кг). Внесение в почву высоких доз ФГ, в том числе в составе ОМУ, способствовало повышению концентрации Sr в 1.5–2.0 раза по сравнению с контролем, в то время как внесение только ИП не влияло на его содержание. Величина суммарного показателя загрязнения даже при самом высоком содержании Sr в почве (260 мг/кг) была равна 2, тем самым указывая на допустимый уровень загрязнения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, при внесении удобрений (ФГ, ИП или ОМУ) в почву на уровне следов оставалось содержание мышьяка, Cd, Hg и Se (1-й класс токсичности); Mo и Sb (2-й класс); W и V (3-й класс). Практически не изменилось по

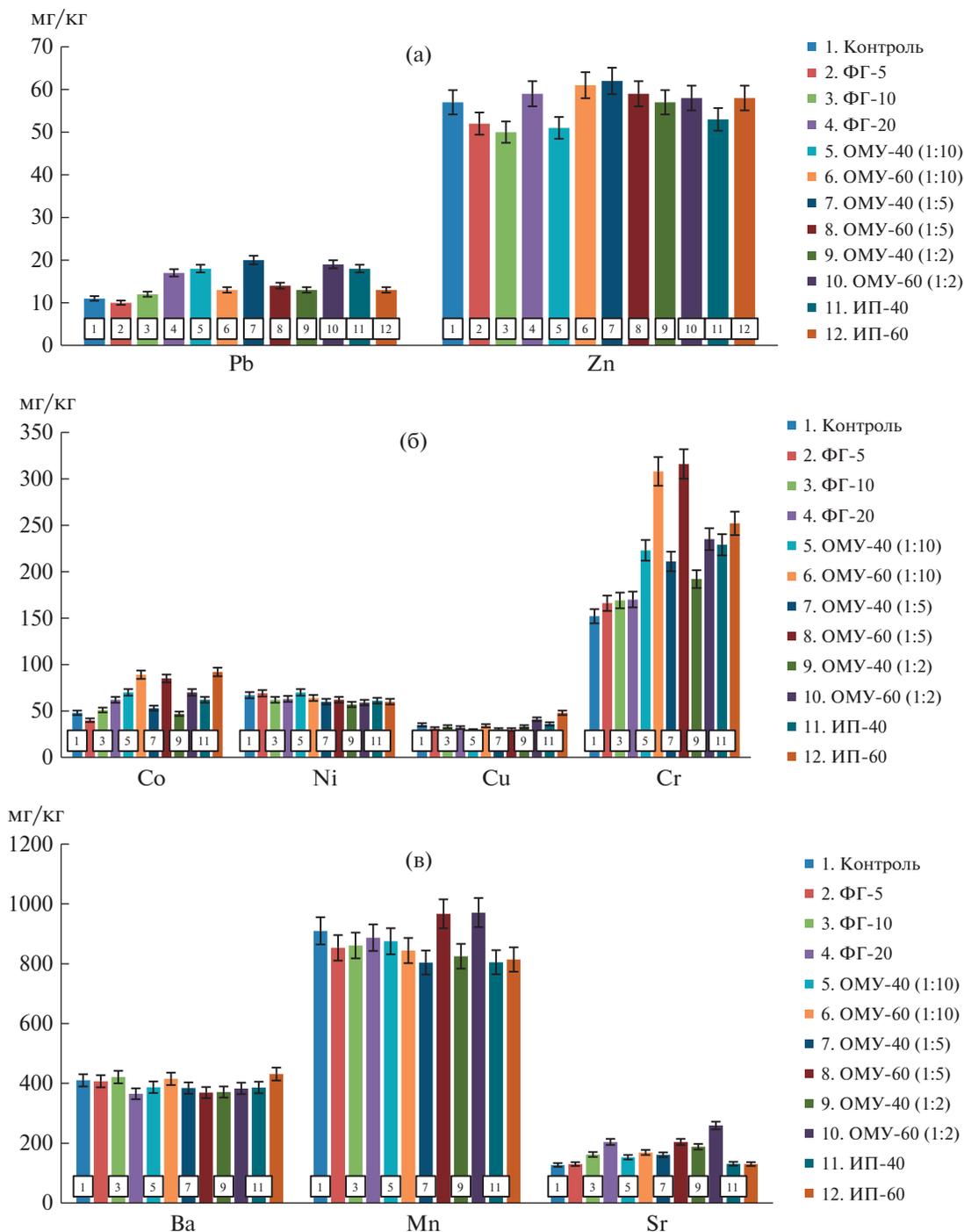


Рис. 1. Содержание токсичных элементов: (а) – 1-го, (б) – 2-го, (в) – 3-го класса опасности.

сравнению с контрольным вариантом содержание Zn, Ni, Cu, Ba и Mn, содержание которых в почве было значительно больше, чем в ФГ.

Содержание Pb, Co, Cr и Sr возрастало при внесении повышенных доз удобрений. При этом на повышение концентрации Pb и Sr повлияло в основном добавление высоких доз ФГ, в то время

как содержание Co и Cr увеличивалось при больших дозах ИП.

В целом при внесении удобрений содержание элементов 3-х классов токсичности не превышало ПДК, суммарный эффект токсичных элементов оценивали как допустимый. Таким образом, использование в качестве удобрения ФГ и ИП, а

также их сочетания в изученных дозах и соотношениях было экологически безопасным.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калиниченко В.П. Эффективное использование фосфогипса в земледелии // Вестн. междунар. ин-та питания раст. 2017. № 1. С. 1–33.
2. Hassoune H., Lahhit M., Khalid A., Lachehab A. Application of leaching tests on phosphogypsum by infiltration-percolation // Water Sci. Technol. 2017. V. 76. № 7. P. 1844–1851. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.368>
3. Saadaoui E., Ghazel N., Ben Romdhane C., Massoudi N. Phosphogypsum: potential uses and problems – a review // Inter. J. Env. Stud. 2017. V. 74. № 4. P. 558–567. <https://doi.org/10.1080/00207233.2017.1330582>
4. Мещеряков Ю.Г., Федоров С.В. Проблемы промышленной переработки фосфогипса в РФ, состояние и перспективы // Фундамент. исслед.-я. 2015. № 6–2. С. 273–276.
5. Воропаева З.И., Троценко И.А., Парфенов А.И. Изменение свойств коркового солонца содового засоления при проведении однократной и повторной мелиорации фосфогипсом // Почвоведение. 2011. № 3. С. 346–357.
6. Габбасова И.М., Сулейманов Р.Р. Трансформация серых лесных почв при техногенном засолении и осолонцевании и в процессе их рекультивации в нефтедобывающих районах Южного Приуралья // Почвоведение. 2007. № 9. С. 1120–1128.
7. Габбасова И.М., Сулейманов Р.Р., Гарипов Т.Т. Деградация и мелиорация почв при загрязнении нефтепромысловыми сточными водами // Почвоведение. 2013. № 2. С. 226–233. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13020056>
8. Семендяева Н.В., Елизаров Н.В. Динамика содержания натрия в профиле мелиорированных солонцов Барабы // Агрохимия. 2016. № 10. С. 12–19.
9. Al-Enazy A.-A., Al-Barakah F., Al-Oud S., Usman A. Effect of phosphogypsum application and bacteria co-inoculation on biochemical properties and nutrient availability to maize plants in a saline soil // Arch. Agron. Soil Sci. 2018. V. 64. № 10. P. 1394–1406. <https://doi.org/10.1080/03650340.2018.1437909>
10. Prochnow L., Caires E., Rodrigues E.C. Phosphogypsum use to improve subsoil acidity: the Brazilian experience // Better Crops. 2016. V. 100. № 2. P. 13–15.
11. Трофимов И.Т., Макарычев С.В., Иванов А.Н. Использование дефеката для известкования почв западной Сибири // Плодородие. 2006. № 4. С. 15–16.
12. Belic M., Nestic L., Dimitrijevic M., Petrovic S., Ciric V., Pekec S., Vasin J. Impact of reclamation practices on the content and qualitative composition of exchangeable base cations of the solonetz soil // Aust. J. Crop Sci. 2012. V. 6. № 10. P. 1471–1480.
13. Irshad M., Saleem A., Faridullah Hassan A., Pervez A., Eneji A.E. Phosphorus solubility and bioavailability from poultry litter supplemented with gypsum and lime // Canad. J. Soil Sci. 2012. V. 92. № 6. P. 893–900. <https://doi.org/10.4141/cjss2012-004>
14. Samet M., Karray F., Mhiri N., Kamoun L., Sayadi S., Gargouri-Bouzid R. Effect of phosphogypsum addition in the composting process on the physico-chemical proprieties and the microbial diversity of the resulting compost tea // Environ. Sci. Pollut. Res. 2019. V. 26. № 21. P. 21404–21415. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05327-3>
15. Габбасова И.М., Гарипов Т.Т., Сидорова Л.В., Сулейманов Р.Р., Назырова Ф.И., Баязитова Л.И., Комиссаров А.В., Яубасаров Р.Б. Использование куриного помета как удобрения на агрочерноземе Южного Предуралья // Агрохимия. 2016. № 8. С. 30–35.
16. Suleymanov R., Saifullin I., Komissarov M., Gabbasova I., Suleymanov A., Garipov T. Effect of phosphogypsum and turkey litter on the erodibility of agrochernozems of the southern Cis-Ural (Russia) under artificial heavy rainfall // Soil Environ. 2019. V. 38. № 1. P. 81–89. <https://doi.org/10.25252/SE/19/71730>
17. Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification // Hydrol. Earth Syst. Sci. 2007. V. 11. P. 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
18. Протасова Н.А., Горбунова Н.С. Соединения цинка, никеля, свинца и кадмия в обыкновенных черноземах Каменной Степи при длительном применении удобрений и фосфогипса // Агрохимия. 2010. № 7. С. 52–61.
19. Ендовицкий А.П., Калиниченко В.П., Иваненко А.А., Мищенко Н.А. Влияние мелиорации фосфогипсом на состояние свинца и кадмия в черноземах // Агрохимия. 2011. № 10. С. 58–69.
20. Komissarov M., Gabbasova I., Garipov T., Suleymanov R., Sidorova L. The Effect of phosphogypsum and turkey litter application on the properties of eroded agrochernozem in the South Ural region (Russia) // Agronomy. 2022. V. 12. № 11. P. 2594. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112594>
21. Проблемы экологии: принципы их решения на примере Южного Урала / Под ред. Н.В. Старовой. М.: Наука, 2003. 288 с.
22. Асылбаев И.Г., Хабиров И.К. Содержание щелочных и щелочноземельных металлов в почвах Южного Предуралья // Почвоведение. 2016. № 1. С. 29–38. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16010020>
23. Литвинович А.В., Лаврищев А.В. Стронций в системе удобрения (мелиоранты)—почва—природные воды—растения—животные (человек) // Агрохимия. 2008. № 5. С. 73–86.
24. Любимова И.Н., Борисочкина Т.И. Влияние потенциально-опасных химических элементов, содержащихся в фосфогипсе, на окружающую среду // М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева РАН, 2007. 46 с.

## Content of Toxic Elements after Introduction of Phosphogypsum and Litter into Slightly Eroded Agrochernozem

I. M. Gabbasova<sup>a</sup>, T. T. Garipov<sup>a</sup>, M. A. Komissarov<sup>a,#</sup>, and O. A. Melentyeva<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Ufa Institute of Biology UFRS RAS  
prosp. Oktyabrya 69, Ufa 450054, Russia*

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

When using by-products and wastes of industrial and agricultural production (phosphogypsum (PG) and turkey litter (TL)) as a fertilizer, it is necessary to take into account not only the content of nutrients, but also environmental safety, including the presence of toxic elements. A small-plot field experiment was conducted on slightly eroded agrochernozem in the forest-steppe zone of the Bashkir Cis-Urals. PG was applied once at doses of 5, 10, and 20 t/ha; TL – in doses of 40 and 60 t/ha; organo-mineral fertilizer (OMF) – 40 and 60 t/ha at ratios of PG and TL 1 : 10, 1 : 5 and 1 : 2. After applying of PG, TL, or OMF into the soil, the content of As, Cd, Hg, Se, Mo, Sb, W, and V remained at the trace level. The content of Zn, Ni, Cu, Ba, and Mn remained practically unchanged compared to the control variant, but was significantly higher than in the initial PG. The content of Pb and Sr increased mainly with the addition of high doses of PG, while those of Co and Cr increased with high doses of TL. In general, the content of elements of three toxicity classes did not exceed the MPC, the total effect of pollution was assessed as permissible.

*Keywords:* agrochernozem, phosphogypsum, bird droppings, toxic elements, total pollution effect.

## АДАПТАЦИЯ МЕТОДА АНАЛИТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ $\alpha$ -АМИЛАЗЫ В ЗЕРНЕ ТРИТИКАЛЕ

© 2023 г. Е. К. Барнашова<sup>1</sup>, А. Н. Покидышев<sup>2</sup>, О. В. Слюзова<sup>2</sup>, Ю. С. Гардина<sup>2</sup>,  
С. В. Жилин<sup>1</sup>, К. А. Тараскин<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup>Федеральный аграрный научный центр Юго-Востока  
410010 Саратов, ул. Тулайкова, 7, Россия

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт прикладной акустики  
141981 Дубна Московская обл., ул. 9 Мая, 7а, Россия

\*E-mail: kant1958@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.03.2023 г.

После доработки 08.04.2023 г.

Принята к публикации 14.06.2023 г.

Зерновая культура тритикале – перспективная для культивации в различных регионах средней полосы России. Стабильная урожайность, высокая устойчивость к неблагоприятным условиям, позволяют рассматривать это злаковое растение в качестве надежного источника получения пищевой продукции. Целью настоящего исследования было количественное определение содержания активной  $\alpha$ -амилазы в зерне тритикале для обеспечения прогноза проведения агротехнических мероприятий. Анализ количественного содержания  $\alpha$ -амилазы осуществлялся на лабораторном спектрофлуориметре с использованием стандартных биотестов, проведенных на основе набора реагентов для определения активности  $\alpha$ -амилазы в сыворотке крови и моче; фактор пересчета для вычисления активности фермента рассчитывали с использованием мультипараметрического калибратора биохимических анализаторов. Для адаптации методики определения  $\alpha$ -амилазы в реальных образцах растительного сырья была использована мука озимых сортов тритикале, выращенных в полевых условиях. По результатам измерения активности  $\alpha$ -амилазы в зерне тритикале проведена сравнительная оценка содержания фермента в муке зерновой культуры урожаев 2020 и 2021 гг.; показана зависимость предуборочного прорастания семян от содержания  $\alpha$ -амилазы в зерне различных сортов, линий и гибридов. На основании полученных данных по содержанию  $\alpha$ -амилазы в зерне тритикале проведена сравнительная оценка характеристики предуборочного прорастания семян. Показатель количественного содержания  $\alpha$ -амилазы может быть рекомендован для использования в диагностике предуборочного прорастания зерна, а также в селекционной работе при создании новых сортов зерновых культур.

*Ключевые слова:*  $\alpha$ -амилаза, методика анализа, тритикале, посевной материал.

DOI: 10.31857/S000218812309003X, EDN: VBENZP

### ВВЕДЕНИЕ

Тритикале – перспективная злаковая культура, созданная при скрещивании пшеницы и ржи, считающаяся в настоящее время самостоятельным ботаническим родом – *Triticosecale* Wittmack ex A. Samus. Продукты переработки зерна тритикале используют для выпуска хлебопекарных [1] и крупяных изделий [2], а также в качестве кормовой продукции для животных [3]. Вторичная переработка растительного сырья тритикале методом биоконверсии [4] позволяет получать крахмал. Мука тритикале по ряду показателей пищевой ценности превосходит продукты помола других злаковых культур. Данные содержания отдельных компонентов и калорийности муки наиболее зна-

чимых зерновых растений представлены в табл. 1. Показано, что тритикале по всем показателям, определяющим пищевую ценность муки, превосходит или находится на сравнимом уровне по отношению к другим злаковым культурам.

Стабильно высокая урожайность ряда сортов тритикале, их устойчивость к неблагоприятным климатическим условиям, а также значительное содержание полезных компонентов в составе зерна [5, 6] способствуют повсеместному распространению посевов этой культуры, общая площадь которых в мире составляет более 4 млн га; ежегодное производство зерна составляет  $\approx 14$  млн т. Более широкому использованию тритикале может способствовать работа по совершенствованию агро-

**Таблица 1.** Показатели калорийности и содержание основных компонентов, определяющих питательную ценность муки злаковых культур

Наименование зерновой культуры	Содержание компонентов, % масс.			Калорийность, ккал/100 г
	белки	жиры	углеводы	
Пшеница	10.3	1.1	68.9	334
Рожь	6.9	1.4	76.7	353
Тритикале	13.2	2.7	54.5	293
Овес	13.0	6.8	64.9	369
Ячмень	10.0	1.6	56.1	284

технических приемов выращивания, изучению свойств и методов эффективной переработки получаемого растительного сырья, тщательному исследованию состава муки тритикале [7], а также возможность прогнозной оценки свойств и характеристик отдельных сортов [8–10] в зависимости от содержания компонентов в посевном материале [11].

Активную работу по изучению и внедрению тритикале проводят на базе Саратовского ФАНЦ Юго-Востока. В последние годы были проанализированы и установлены основные генетические характеристики этой злаковой культуры [12], проведена обширная селекционная работа, выведены перспективные сорта [13]. Кроме того, проведена значительная работа по освоению методик установления качественных и количественных характеристик растительного сырья, осуществлены исследования по изучению компонентного состава продуктов, полученных при переработке растительного сырья, проведена сравнительная оценка различных методов анализа для определе-

ния содержания запасных белков в зерне тритикале [14].

Настоящее исследование посвящено отработке методики количественного определения  $\alpha$ -амилазы в составе зерна тритикале, а также изучению тенденции влияния этого фермента на некоторые свойства различных сортов, линий и гибридов тритикале. Полученные результаты могут быть использованы при установлении свойств, характерных для отдельных сортов тритикале, а также для диагностики подверженности зерна к преждевременной прорастаемости в предуборочный период, а также диагностики межсезонной сохранности семенного материала.

Цель работы – адаптация метода количественного определения содержания активной  $\alpha$ -амилазы в зерне тритикале для обеспечения прогноза проведения агротехнических мероприятий.

*Обоснование направления исследований.*  $\alpha$ -Амилаза – фермент, входящий в состав биологических объектов как растительного, так и животного происхождения. Имеет сложное структурное строение (рис. 1). Наиболее значимой функцией  $\alpha$ -амилазы является активация расщепления сложных углеводов (крахмала, гликогена, полисахаридов) до простых моносахаридов. В семенном материале растений данная функция является одним из механизмов, задействованных для получения питательных веществ, используемых зародышем при активации начальных стадий развития [15].

В зерновках злаковых культур амилаза является ферментом инициации процесса предпосевного прорастания [16], которое происходит при поглощении посевным материалом достаточного количества воды и при благоприятном тепловом режиме. Способность зерна удерживать влагу является сортовой особенностью, которая зависит от ряда факторов, основными из которых явля-

**Рис. 1.** Структура молекулы  $\alpha$ -амилазы.

ются проницаемость семенной оболочки, способность белков и крахмала связывать воду. Этими причинами может объясняться различная скорость активации гидролитических ферментов у отдельных сортов зерновых культур в условиях повышенной влажности.

Вместе с тем необходимо отметить, что длительное воздействие на семена повышенной влажности и температуры, приводящее к ускоренной активации амилаз и способствующее прорастанию зерна, возможно не только в предпосевной период, а практически на любой стадии хранения семенного материала, а также в предуборочный период в процессе созревания зерна в условиях повышенной влажности и теплых погодных условий. Увеличение содержания воды в процессе созревания зерна в предуборочный период, происходящее под воздействием влажного климата, индуцирует накопление  $\alpha$ -амилазы, и зерно прорастает в колосе на корню, в валках или во влажном ворохе. Эта особая форма энзимного истощения, происходящего при гидролизе амилазой крахмальных гранул и крахмального клейстера, наблюдается у растений пшеницы, ржи и тритикале. Фермент амилаза оказывает определенное влияние на биохимические процессы, происходящие при проведении операций переработки муки [17, 18]. Существенное значение при этом имеет количественное содержание амилазы, в особенности, ее  $\alpha$ -формы. В тесте должно содержаться некоторое количество  $\alpha$ -амилазы для расщепления крахмала в виде амилопектина, однако при избытке этого фермента крахмал может полностью раствориться. Избыточный гидролиз крахмала после его клейстеризации, вызванной высокой активностью  $\alpha$ -амилазы, приводит к резкому ухудшению качества хлеба. Исходя из этого, представляется актуальной задача освоения надежной аналитической методики, позволяющей производить оценку количественного содержания  $\alpha$ -амилазы в зерне на любой стадии проведения агротехнических мероприятий, хранения и переработки растительного сырья.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Почвенный покров опытного участка представлен темно-каштановыми почвами. Почва среднегумусированная (2.6–3.5%), характеризуется низким содержанием нитратного азота (5–8 мг/кг), высоким содержанием подвижного калия (301–400 мг/кг), очень высоким содержанием подвижного фосфора (>60 мг/кг), а также имеет нейтральную реакцию почвенного раствора – 6.1–6.5 ед. (данные ФАНЦ Юго-Востока). Содержание ор-

ганического вещества в почве определяли по методу Тюрина в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91), подвижных соединений К и Р – по Мачигину в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26205-91), нитратного азота – ионометрическим методом (ГОСТ 26951-86); реакцию почвенного раствора определяли потенциометрическим методом в водной суспензии (ГОСТ 26423-85).

Оценку активности фермента проводили с использованием набора реагентов для определения активности  $\alpha$ -амилазы в сыворотке крови и моче кинетическим методом “ $\alpha$ -амилаза ольвекс” (кат. № 011.002, ООО “Ольвекс диагностикум”, Россия). Фактор пересчета для вычисления активности фермента рассчитывали с использованием мультипараметрического калибратора для калибровки биохимических анализаторов “Мультикалибратор ольвекс” (кат. № 043.001, ООО “Ольвекс диагностикум”, Россия). Контроль качества набора реагентов и процедуры выполнения анализа осуществляли с помощью контрольной сыворотки для биохимических исследований “Контрольная сыворотка-ольвекс” (кат. № 042.001, ООО “Ольвекс диагностикум”, Россия).

Принцип метода: под действием фермента  $\alpha$ -амилазы синтетический субстрат 4,6-этиленден(G7)-*p*-нитрофенил-(G1)- $\alpha$ ,D-мальтогептозид (EPS) гидролизуетсся с образованием нитрофенилмальтозидов, которые подвергаются дальнейшему расщеплению  $\alpha$ -глюкозидазой до глюкозы и окрашенного продукта реакции – *para*-нитрофенола (*p-NP*). Скорость нарастания концентрации *p-NP* в ходе 2-й реакции оценивали по увеличению оптической плотности реакционной среды при длине волны 405 нм; этот показатель пропорционален активности  $\alpha$ -амилазы. В ходе проведения анализа реагенты готовили согласно инструкциям производителя.

Стандартизированная процедура отбора проб зерна одного сорта, гибрида или линии тритикале включала забор материала из 3-х отдельных точек в одном контейнере хранения. Зерно, отобранное в составе проб для проведения анализа, обрабатывали с использованием стандартных методов [19, 20]. Выполнение основных технологических операций при подготовке зерна к помолу на основании рекомендаций [21] проводили в соответствии с параметрами и режимами очистки зерна пшеницы. Помол зерна тритикале производили с использованием лабораторной мельницы ИКА, модель A10 basis (производство Германия). Муку хранили в герметичной таре при температуре  $4 \pm 2^\circ\text{C}$ . Для оценки гранулометрического состава размолта муки тритикале было проведено рассеивание полученного материала с использо-

ванием стандартного набора (комплекта) лабораторных сит для муки по ГОСТ 27560-87.

*Методика экстракции фермента  $\alpha$ -амилазы.* Исследования проводили на базе стандартной аналитической лаборатории с использованием аттестованного оборудования, стандартных материалов и реактивов. Точную навеску (0.187 г) муки тритикале помещали в полипропиленовую пробирку для гомогенизации, содержащую 0.9 мл 50 мМ натрий-ацетатного буфера (рН 6.5) и 0.5 г циркониевых шариков диаметром 1.4 мм. Обработку материала проводили в гомогенизаторе Precellys Evolution (Bertin technologies, Франция) при температуре  $4 \pm 2^\circ\text{C}$ , трехкратно в течение 15 с, с паузами по 30 с для охлаждения материала. Дальнейшую экстракцию фермента проводили в течение 4 ч при температуре  $4 \pm 2^\circ\text{C}$  и постоянном перемешивании с использованием ротационного перемешивателя марки BioSan Multi bio RS-24 (BioSan, производство Латвии). После завершения экстракции образцы переносили в полипропиленовые пробирки объемом 2.0 мл и центрифугировали при достижении показателя 1600 г в течение 15 мин при температуре  $22 \pm 2^\circ\text{C}$ . Полученные супернатанты переносили в полипропиленовые пробирки объемом 1.5 мл и в течение не более 1 ч использовали для оценки активности  $\alpha$ -амилазы.

*Определение активности  $\alpha$ -амилазы.* Оценку активности фермента  $\alpha$ -амилазы в полученных экстрактах муки тритикале проводили в 96-луночных плоскодонных микропланшетах с использованием спектрофлуориметра Tecan Infinite 200 M Plex Pro (Tecan, производство Швейцария). Для проведения анализа из компонентов комплекта реагентов готовили рабочий раствор в соответствии с инструкцией изготовителя набора. В лунки 96-луночного полистиролового микропланшета вносили по 300 мкл рабочего раствора и 12 мкл исследуемого образца или контрольного материала (калибратор, контрольная сыворотка). Перед началом работ рабочий раствор и микропланшет прогревали до температуры  $37^\circ\text{C}$ . После внесения компонентов микропланшет помещали в термостатируемый ( $37^\circ\text{C}$ ) отсек спектрофлуориметра и через 2 мин инкубирования начинали измерение оптической плотности реакционной смеси при длине волны 405 нм. Измерения повторяли с интервалом 1 мин в течение 4 мин. Расчет содержания  $\alpha$ -амилазы в зерне производили по формуле (1):

$$A \text{ (Ед/кг)} = 5.8 \times F \times \Delta E / \text{мин}, \quad (1)$$

где:  $F$  – фактор пересчета, рассчитанный по мультикалибратору,

$\Delta E / \text{мин}$  – средняя величина изменения оптической плотности реакционной смеси за 1 мин.

Измерения проводили на 3-х образцах каждого вида муки. Каждый из образцов анализировали в 3-х параллельных измерениях. В качестве итогового результата представляли расчетную величину медианы, полученную при обработке данных 3-х параллельных измерений.

Для адаптации методики по определению  $\alpha$ -амилазы в сырье растительного происхождения была использована мука различных озимых линий, сортов и гибридов тритикале, выращенных в полевых условиях на опытных участках научно-исследовательского института сельского хозяйства Юго-Востока (г. Саратов).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В процессе культивации культуры тритикале в течение ряда лет было установлено, что различные сорта, линии или гибриды этой злаковой культуры в разной степени подвержены явлению предуборочного прорастания зерна, происходящему в колосе на корню, в валках или во влажном ворохе. Кроме того, было установлено, что этот фактор проявлялся в разной степени активности в различные годы и, как правило, зависел от климатических явлений, увеличивающих влажность окружающей среды (дожди, туманы, росы и др.). Вместе с тем отмечена высокая устойчивость ряда сортов, линий или гибридов тритикале, практически не подверженных влиянию нежелательных воздействий и проявляющих высокую устойчивость к прорастанию зерна в полевых условиях в предуборочный период. Нежелательный эффект несвоевременного прорастания зерна влечет за собой ряд сложностей, требующих проведения дополнительных мероприятий по повышению эффективности сушки, сортировки и выбраковки материала неудовлетворительного качества, созданию особых условий в период межсезонного хранения. Кроме того, при активном воздействии неблагоприятных сезонных факторов в некоторые годы происходят значительные потери урожая зерна. Комплекс перечисленных обстоятельств приводит к необходимости поиска и устранения причин, определяющих создавшееся положение.

По всей видимости, наиболее эффективным методом решения проблемы предуборочного прорастания зерновой культуры тритикале может являться выбор или создание сортов, линий или гибридов, наиболее устойчивых к влиянию этого фактора. В то же время слепой выбор из известных в настоящее время разновидностей культур,

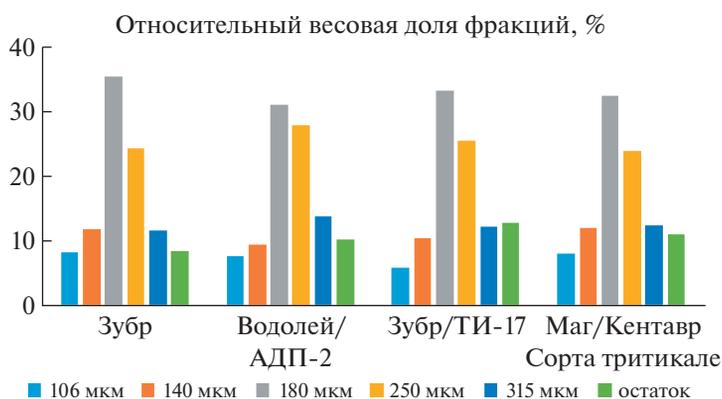


Рис. 2. Гранулометрический состав муки тритикале после просеивания.

как правило, не приводит к получению устойчивого, надежного, научно обоснованного результата. Поэтому, на наш взгляд, необходимо установить надежный критерий, определяющий или обозначающий причину исследуемого явления. В связи с этим была предложена гипотеза о наличии определенной закономерности между характеристикой устойчивости культуры к предуборочному прорастанию и активностью фермента  $\alpha$ -амилазы, содержащейся в зерне. Настоящее предположение обосновано в соответствии с известным свойством этого вещества активировать ростовые процессы в семенном материале [22] в предпосевной период, а также в условиях хранения, при действии неблагоприятных факторов (повышенные влажность и температура).

Предложенную гипотезу проверяли на основании сравнительной оценки данных содержания  $\alpha$ -амилазы в семенном материале тритикале и результатов оценки устойчивости различных сортов, линий и гибридов этой зерновой культуры, полученных при проведении многолетних экспериментальных исследований на опытных участках в полевых условиях. По результатам анализа данных была проведена сравнительная оценка количественного содержания фермента  $\alpha$ -амилазы в муке зерновой культуры тритикале урожая 2020 и 2021 гг. Для опытов использовали не проросшие зерна тритикале, отобранные из состава семенного фонда, находящиеся в состоянии покоя в период межсезонного хранения семенного материала. Для обеспечения полной экстракции фермента из состава семенного материала зерно подвергали помолу и затем полученный продукт (муку) использовали для анализа в соответствии с предлагаемой методикой определения  $\alpha$ -амилазы в сыворотке крови и моче кинетическим методом, адаптированным применительно к сырью растительного происхождения.

Помол и просеивание муки производили в одинаковых условиях для всех испытанных образцов с соблюдением стандартных процедур в лабораторных условиях. Полученные результаты размолы для муки тритикале сорта Зубр и 3-х гибридов тритикале представлены на гистограмме (рис. 2).

В связи с отсутствием тест-систем для определения  $\alpha$ -амилазы в объектах на основе растительного сырья была проведена оценка возможности применения стандартных тест-систем, используемых для определения активности  $\alpha$ -амилазы в сыворотке крови и моче кинетическим методом. Для реализации методики при решении задачи настоящего исследования была применена стандартная процедура организации анализа, использованная при тестировании биологических объектов в медицинской практике.

Каждая из проб муки тритикале проходила процедуру подготовки, и затем ее анализировали путем проведения 3-х параллельных измерений количественного содержания  $\alpha$ -амилазы. Обработку экспериментальных результатов производили с использованием стандартных методов математической статистики, вычисление медианы было проведено с привлечением программы Excel 15.0. Пример полученных экспериментальных данных и результаты вычислений для тритикале сорта Зубр и линии тритикале Водолей/АДП-2//Colina представлены в табл. 2.

Для получения массива экспериментальных данных по результатам анализа количественного содержания  $\alpha$ -амилазы в муке тритикале были привлечены сорта, гибриды и линии культуры, возделываемые в режиме озимого выращивания. Отбор проб производили в местах межсезонного хранения зерна (посевого материала). Полученные результаты анализа муки на содержание  $\alpha$ -

**Таблица 2.** Данные анализа количественного содержания  $\alpha$ -амилазы в муке и величины показателей проведенных расчетов для образцов муки тритикале сортов Зубр, Водолей/АДП-2//Colina и линии тритикале Водолей/АДП-2//Colina (урожай 2021 г.)

Сорт, линия, (год урожая)	Образец	Повторность	Активность $\alpha$ -амилазы			
			ед./л	ед./кг		
				в пробе	медиана в серии	медиана в группе
Зубр (2021 г.)	1/1	1/1/1	50	290	250	271
		1/1/2	43	250		
		1/1/3	33	189		
	1/2	1/2/1	48	281	305	
		1/2/2	53	305		
		1/2/3	55	321		
	1/3	1/3/1	45	264	264	
		1/3/2	80	465		
		1/3/3	34	198		
Водолей/АДП-2// Colina (2021 г.)	2/1	2/1/1	40	234	222	106
		2/1/2	38	222		
		2/1/3	32	187		
	2/2	2/2/1	16	95	99	
		2/2/2	17	99		
		2/2/3	18	104		
	2/3	2/3/1	21	120	106	
		2/3/2	18	106		
		2/3/3	17	99		

амилазы в период межсезонного хранения зерна представлены в табл. 3. Кроме того, в сводную таблицу включены эмпирические данные, характеризующие устойчивость различных озимых сортов, гибридов и линий, полученные при проведении многолетних исследований опытных полевых тритикале.

На основании данных, представленных в табл. 3, прослежена тенденция, свидетельствующая о различиях содержания  $\alpha$ -амилазы в составе муки тритикале в зависимости от года культивации. Показатели зерна урожая 2020 г. были более низкими, чем результаты, полученные при анализе зерна тритикале урожая 2021 г. Кроме того, отмечена корреляция между содержанием  $\alpha$ -амилазы в составе муки и результатами наблюдений устойчивости зерна тритикале к предуборочному прорастанию. На этом основании можно сделать заключение о получении подтвержденной зави-

симости показателей количественного содержания  $\alpha$ -амилазы в зерне тритикале и устойчивостью исследованной зерновой культуры к факторам, определяющим стабильность состояния зерновки в предуборочной фазе вегетации.

Количественные показатели содержания  $\alpha$ -амилазы в зерне различных линий, сортов и гибридов тритикале позволили составить диаграмму, предназначенную для прогнозной оценки при планировании сезонных агротехнических мероприятий, на основании данных устойчивости к предуборочному прорастанию. График прогнозной оценки представлен на рис. 3.

Методика количественного определения  $\alpha$ -амилазы, адаптированная для анализа состава растительного сырья, освоенная в процессе проведения настоящего исследования, может быть рекомендована к внедрению в селекционную работу для прогноза характеристики устойчивости

**Таблица 3.** Содержание  $\alpha$ -амилазы в муке тритикале различных сортов, линий, гибридов

Наименование сорта, линии/гибриды	Характеристика устойчивости к предуборочному прорастанию	Среднее содержание $\alpha$ -амилазы, ед./кг	
		2020 г.	2021 г.
МАГ/АДЛеук1701 h 389/Сар 8	Высокая	99.2	113
Л-14, Воронеж/Дон	Средняя	111	121
Зубр	Низкая	247	271
Водолей/АДП-2//Colina	Высокая	91.6	106
КС-1 Саргау/Полесский		76.6	112
Водолей/АДП//Modus	Средняя	105	124
Студент/Патриот//Корнет	Очень высокая	49.9	92.0
Водолей/АДП-2//Л.39 (озимая пшеница)		30.7	59.3
Newton/Саргау//KS-88Т-142///Корнет		11.6	34.8
Водолей/АДП-2	Средняя	108	128
Студент/Водолей//Полесский 10///АДП-2	Очень высокая	60.9	74.5
Зубр/ТИ-17	Средняя	117	141
Маг/Кентавр	Низкая	150	165

к предуборочному прорастанию вновь создаваемых сортов, гибридов и линий тритикале.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

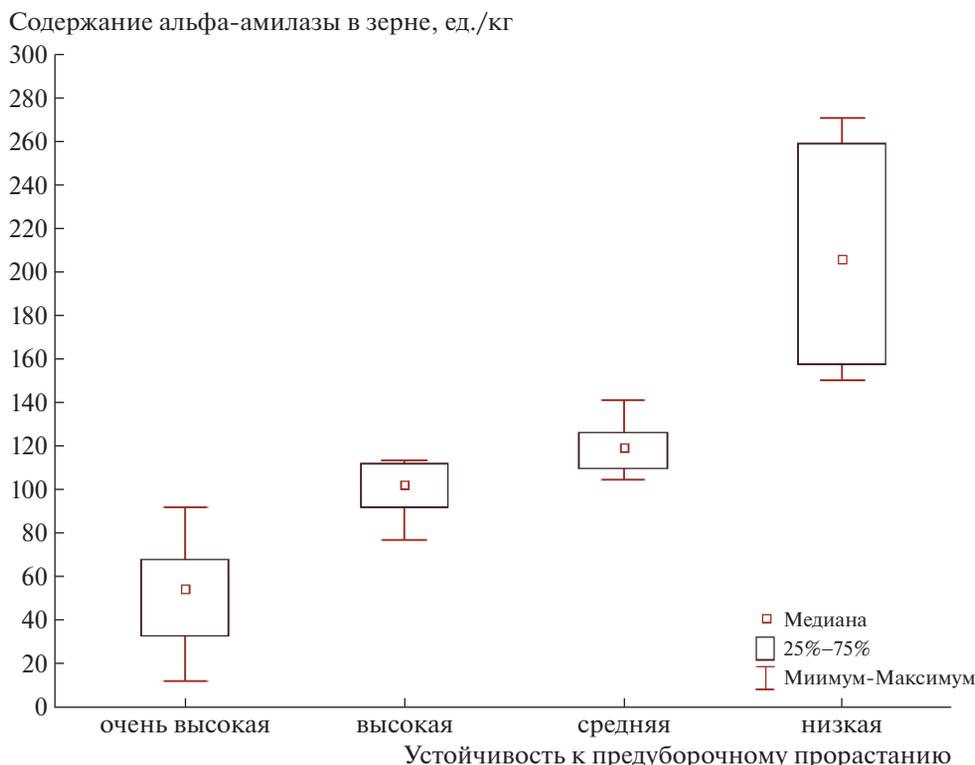
Зерновая культура тритикале, являющаяся самостоятельным ботаническим родом – *Triticosecale* Wittmack ex A. Camus, перспективна для культивации в различных регионах средней полосы России. Стабильная урожайность, высокая устойчивость к неблагоприятным условиям выращивания, а также сбалансированный по содержанию ценных пищевых компонентов состав позволяют рассматривать это злаковое растение в качестве перспективного источника получения высококачественной пищевой продукции. Разработанные к настоящему времени способы переработки зерна тритикале позволяют получать хлебопекарские и крупяные изделия, крахмал, а также кормовые смеси для вскармливания животных.

Многолетние исследования, проведенные с зерновым материалом, показали, что качество получаемых на основе тритикале пищевых продуктов в значительной степени определяется компонентным составом растительного сырья. В частности, установлено, что значительную роль играет содержание в муке тритикале фермента  $\alpha$ -амилазы. Кроме того, известно, что при проведе-

нии сезонных агротехнических мероприятий, осуществляемых при возделывании тритикале, количественное содержание  $\alpha$ -амилазы в зерне влияет на сроки ростовых циклов: чрезмерное содержание этого фермента способствует преждевременному прорастанию зерновок и препятствует сохранности посевного материала в период межсезонья.

В рамках настоящего исследования проведена работа по оценке возможности использования набора реагентов для определения активности  $\alpha$ -амилазы в сыворотке крови и моче кинетическим методом для установления количественного содержания этого фермента в зерне тритикале. Отработана методика экстракции активного компонента из продукта помола зерна тритикале и проведены измерения активности  $\alpha$ -амилазы в образцах различных сортов, линий и гибридов исследованной зерновой культуры.

На основании полученных данных по содержанию  $\alpha$ -амилазы в зерне различных сортов, линий и гибридов тритикале проведена сравнительная оценка количества фермента в муке в зависимости от сорта и установлена корреляция экспериментальных данных содержания  $\alpha$ -амилазы в зерне с наблюдаемой характеристикой явления предуборочного прорастания семян. Показатель количественного содержания  $\alpha$ -амилазы в



**Рис. 3.** Диапазоны содержания  $\alpha$ -амилазы в зерне линий, сортов и гибридов тритикале с различной устойчивостью к предуборочному прорастанию.

зерне может быть рекомендован для использования в процессе планирования сезонных агротехнических мероприятий при культивировании тритикале.

Адаптированная методика количественного определения  $\alpha$ -амилазы в составе растительного сырья может быть использована при проведении селекционной работы для прогноза характеристики устойчивости к предуборочному прорастанию вновь создаваемых сортов и линий тритикале.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паныковский Г.А. Продукты переработки зерна тритикале в технологии хлебобулочных изделий // Пищ. и перерабат. пром-ть. 2004. № 1. С. 100.
2. Леонова С.А., Погонец Е.В. Технология крупы из пророщенного зерна тритикале // Технол. и товаровед. инновац. пищ. продуктов. 2016. № 1 (36). С. 30–33.
3. Bellil I., Bouguennec A., Khelifi D. Diversity of seven glutenin and secalin loci within triticale cultivars grown in France // Notul. Bot. Horti Agrobi. Cluj-Napoca. 2010. V. 38. № 2. P. 48–55.
4. Лукин Н.Д., Уланова Р.В., Кравченко И.К., Колпакова В.В., Гольдштейн В.Г. Биоконверсия вторичных продуктов переработки зерна тритикале на крахмал с использованием гриба *Pleurotus ostreatus* 23 // Химия раст. сырья. 2018. № 4. С. 225–234.
5. Витол И.С., Карпиленко Г.П., Кандроков Р.Х., Старищенков А.А., Коваль А.И., Жильцова Н.С. Белково-протеиназный комплекс зерна тритикале // Хранение и перераб. сельхозсырья. 2015. № 8. С. 36–39.
6. Aprodu I., Banu I. Comparative analyses of physico-chemical and technological properties of triticale, rye and wheat // Ann. Univers. Dunarea De Jos of Galati, Fascicle ViFood Technol. 2016. V. 40. № 2. P. 31–39.
7. Jiang Q.-T., Wei Y.-M., Pu Z.-E., Peng Y.-Y., Zheng Y.-L., Andre L., Lu Z.-X. Characterization of omegasccalin genes from rye, triticale, and a wheat 1BL/1RS translocation line // J. Appl. Genet. 2010. T. 51. № 4. С. 403–411.
8. Данаева М.А., Бободжанов В.А., Исмоилов М.И. Роль индивидуального отбора в селекции яровых гексаплоидных тритикале // Хранение и перераб. сельхозсырья. 2003. № 8. С. 192–194.
9. Погонец Е.В., Леонова С.А. Характеристика технологических свойств тритикале сорта Башкирская короткостебельная // Зерн. хоз-во России. 2011. № 3. С. 63–67.
10. Бадамшина Е.В., Лещенко Н.И., Калужина О.Ю., Леонова С.А. Влияние сортовых особенностей на технологию переработки зерна тритикале селекции Республики Башкортостан // Вестн. КрасГАУ. 2022. № 7 (184). С. 86–94.

11. Чумикина Л.В., Арабова Л.И., Колпакова В.В., Топунов А.Ф. Активность ферментов обмена глутамина в прорастающем зерне тритикале // Физиология растений і генетика. 2013. Т. 45. № 5. С. 390–398.
12. Дьячук Т.И., Акинина В.Н., Жилин С.В., Хомякова О.В., Барнашова Е.К., Калашникова Э.В., Окладникова В.П. Гаплоидия тритикале *in vitro* (обзор лит-ры) // Зерн. хоз-во России. 2022. № 1 (79). С. 39–45.
13. Дьячук Т.И., Акинина В.Н., Жилин С.В., Хомякова О.В., Барнашова Е.К., Калашникова Э.В., Куликова В.П. Новый сорт озимого тритикале Зубр // Аграрн. научн. журн. 2022. № 6. С. 19–22.
14. Дьячук Т.И., Рудных С.К., Барнашова Е.К., Грибова Е.Д. Разработка процесса выделения глиадина из зерновой культуры тритикале и способа идентификации образца методом капиллярного электрофореза // Вестн. Международ. ун-та природы, общества и человека “Дубна”. Сер. Естеств. и инж. науки. 2020. № 4 (49). С. 23–29.
15. Минеев В.Г. Агрехимия. М.: Колос, 2004. 720 с.
16. Кошкин Е.И., Гатаулина Г.Г., Дьяков А.Б. Частная физиология полевых культур. М.: Колос, 2005. 344 с.
17. Каримов О.С., Шарипова М.Б., Икрами М.Б. Влияние рН на активность и стабильность фермента амилазы в пшеничной муке // Вестн. технол. ун-та Таджикистана. 2021. № 1 (44). С. 49–54.
18. Казаков Е.Д., Кретович В.Л. Биохимия зерна и продуктов его переработки. М.: Агропромиздат, 1989. 368 с.
19. Munoz-Insa A., Gastl M., Becker T. Influence of malting on the protein composition of *Triticale* ( $\times$  *Triticosecalle* Wittmack) “Trigold” // Cereal Chem. 2016. Т. 93. № 1. С. 10–19.
20. Мацкевич И.В., Невзоров В.Н., Кох Ж.А., Безъязыков Д.С. Совершенствование технологии подготовки зерна к переработке // Научно-практические аспекты развития АПК: Мат-лы нац. научн. конф. Красноярск, 12 ноября 2020 г. Т. 2. Красноярск: КрасГАУ, 2020. С. 25–27.
21. Панкратов Г.Н., Мелешкина Е.П., Витол И.С., Кандроков Р.Х. Мука из тритикале – ценный продукт питания // Кондит. и хлебопек. производ-во. 2017. № 9–10. С. 54–59.
22. Казаков Е.Д., Карпиленко Г.П. Биохимия зерна и хлебопродуктов. СПб.: ГИОРД, 2005. 512 с.

## Adaptation of the Method of Analytical Control of the Content of $\alpha$ -Amylase in Triticale Grain

E. K. Barnashova<sup>a</sup>, A. N. Ostyshev<sup>b</sup>, O. V. Sluzova<sup>b</sup>,  
Yu. S. Gardina<sup>b</sup>, S. V. Zhilin<sup>a</sup>, and K. A. Taraskin<sup>a, #</sup>

<sup>a</sup>Federal Agrarian Scientific Center of the South-East  
ul. Tulaykova 7, Saratov 410010, Russia

<sup>b</sup>Scientific Research Institute of Applied Acoustics  
ul. 9 May 7a, Moscow region, Dubna 141981, Russia

<sup>#</sup>E-mail: kant1958@yandex.ru

Triticale grain crop is promising for cultivation in various regions of central Russia. Stable yield, high resistance to adverse conditions, allow us to consider this cereal plant as a reliable source of food production. The purpose of this study was to quantify the content of active  $\alpha$ -amylase in triticale grain to provide a forecast of agrotechnical measures. The analysis of the quantitative content of  $\alpha$ -amylase was carried out on a laboratory spectrofluorimeter using standard bioassays conducted on the basis of a set of reagents for determining the activity of  $\alpha$ -amylase in blood serum and urine; the conversion factor for calculating enzyme activity was calculated using a multiparametric calibrator of biochemical analyzers. To improve the methodology for the determination of  $\alpha$ -amylase in real samples of plant raw materials, flour of winter triticale varieties grown in the field was used. Based on the results of measuring the activity of  $\alpha$ -amylase in triticale grain, a comparative assessment of the enzyme content in the flour of grain crops of 2020 and 2021 was carried out; the dependence of pre-harvest seed germination on the content of  $\alpha$ -amylase in grain of various varieties, lines and hybrids was shown. Based on the data obtained on the content of  $\alpha$ -amylase in triticale grain, a comparative assessment of the characteristics of pre-harvest seed germination was carried out. The indicator of the quantitative content of  $\alpha$ -amylase can be recommended for use in the diagnosis of pre-harvest germination of grain, as well as in breeding work when creating new varieties of grain crops.

*Keywords:*  $\alpha$ -amylase, analysis technique, triticale, seed material.

УДК: 631.811.98

## РЕГУЛЯТОРЫ РОСТА И РАЗВИТИЯ РАСТЕНИЙ: КЛАССИФИКАЦИЯ, ПРИРОДА И МЕХАНИЗМ ДЕЙСТВИЯ

© 2023 г. С. С. Тарасов<sup>1,\*</sup>, Е. В. Михалёв<sup>1</sup>, А. И. Речкин<sup>1</sup>, Е. К. Крутова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия  
603022 Нижний Новгород, просп. Гагарина, 97, Россия

\*E-mail: tarasov\_ss@mail.ru

Поступила в редакцию 06.03.2023 г.

После доработки 12.04.2023 г.

Принята к публикации 14.06.2023 г.

Рассмотрены вопросы природы и механизма действия регуляторов роста и развития растений. Предложено использовать классификацию регуляторов в зависимости от их природы. Выделены 4 группы регуляторов: чистые химические вещества, физические, биологические и комплексные регуляторы. Уделено внимание механизмам взаимосвязи искусственных регуляторов с естественной системой регуляции и интеграции растений.

*Ключевые слова:* регуляторы роста и развития растений, биорегуляторы, биоудобрения, органические удобрения, система регуляции и интеграции растений, фитогормоны, сигнальные системы клетки

DOI: 10.31857/S0002188123090120, EDN: YUDEAW

### ВВЕДЕНИЕ

Регуляторы роста и развития растений (далее регуляторы) (*PPP*) в широком смысле слова можно рассматривать как компоненты биосферы, оказывающие на растение регуляторное влияние. С этой точки зрения под регуляторы попадают множество экологических факторов физической, химической и биотической природы. С физиологической точки зрения регуляторы формируют в растениях соответствующую систему регуляции и интеграции, состоящую как минимум из ферментативного, генетического, мембранного, трофического, гормонального и электрофизиологического компонентов [1]. Ферментативный, генетический и мембранный компоненты системы регулируют метаболизм на клеточном уровне, а трофический, гормональный и электрофизиологический компоненты – на органо-тканевом, организменном и межорганизменном уровнях [2, 3]. Физиологические регуляторы принято делить на растактивирующие и ингибирующие [4], первые как правило запускают процессы роста на начальных этапах онтогенеза, усиливая процессы биосинтеза, клеточного деления, органо- и гистогенеза, а последние способствуют запуску старения, в том числе созревания плодов и семян, переходу в состояние покоя и активации защитных механизмов.

В настоящее время в агрохимической науке не существует единого подхода в классификации регуляторов [5, 6]. Особенностью *PPP* с агрохимической точки зрения является не только их биологический эффект на растение, но и их содержание в почве, воде, удобрениях и др. компонентах, которые априори используются для культивирования растений. По своей природе регуляторы растений можно разделить на 4 группы: регуляторы физической, химической, биологической природы, а также комплексные композиты (рис. 1).

Таким образом, регуляторы можно классифицировать, во-первых, как чистые химические вещества: фитогормоны, аминокислоты, простые сахара, хитозан, летучие органические соединения и пр. [7–14]. Во-вторых, как консортивные и симбиотические организмы, продуцирующие регуляторы и относящиеся к разным группам живых объектов, преимущественно прокариотической и грибной природы, данные объекты объединяют в группу биоудобрений [15–18]. В-третьих, как физические регуляторы, способные изменять метаболические пути растений в том числе за счет прямого регуляторного воздействия (электромагнитное излучение, температура, электрические сигналы), так и за счет эффекта гормезиса [19, 20]. В-четвертых, комплексные регуляторы, как правило включающие в себя сложную смесь ве-



Рис. 1. Классификация регуляторов роста и развития растений с указанием примеров (предложено авторами).

ществ, в состав которой входят как химические, так и биологические регуляторы (экстракты водорослей, грибов и высших растений, гуминовые комплексы, протеиновые гидролизаты кератинсодержащего сырья и т.п.), их часто называют биостимуляторами [5, 21–24].

### ХИМИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Это наиболее распространенная как в природе, так и в сельскохозяйственной деятельности группа регуляторов. Данные вещества способны повлиять на растения различными способами, в том числе через сеть гормональных реакций, например, MAP-киназным путем, напрямую взаимодействуя с ферментами, активируя или ингибируя их, выступать в роли сигнальных молекул, регулировать метаболизм на трофическом уровне и т.п. [2, 25]. Наиболее значимыми и изученными химическими регуляторами являются фитогормоны и гормоноподобные вещества. Фитогормонами называют низкомолекулярные вещества, которые вырабатываются одними клетками, но они действуют на другие в низких концентрациях и регулируют процессы жизнедеятельности растений [2, 26]. Фитогормоны принято делить на 2 основные группы – ростактивирующие и ростин-

гибирующие, к первой группе принято относить ауксины, гиббереллины и цитокинины, а ко второй – абсцизины и этилен [2, 4, 27–39]. Однако такое деление не учитывает концентрацию гормона, от которой направленность их действия может диаметрально изменяться, например, в низких концентрациях ауксины активируют процессы прорастания семян, а в высоких, напротив, ингибируют их [2]. Также стоит отметить, что в растительном организме один процесс регулируется несколькими гормонами, например ауксины, как правило, работают в тандеме с цитокининами, этилен – с ауксинами и т.п. [1, 34–36]. Помимо классических вышеупомянутых гормонов в настоящее время к данной группе веществ также относят жасмонаты, брассистероиды, стригалоктоны, салицилаты и СLE-пептиды, осуществляющие регулирование различных метаболических путей [40–45]. Еще одной группой фитогормонов можно считать синтетические вещества, например,  $\alpha$ -нафтилуксусную кислоту ( $\alpha$ -НУК), 2,4-дихлорфеноксиуксусную кислоту (2,4 Д), кинетин, 6-бензиламинопурин (6-БАП), индолил-3-масляную кислоту (ИМК), калийную соль 3-индолилуксусной кислоты (гетероауксин), 4-хлорфеноксиуксусную кислоту (4-ХФУК) и т.д., которые способны связываться с гормональными ре-

цепторами клеток, из-за чего запускаются схожие биохимические процессы, приводящие к аналогичному ответу [46–50]. Это позволяет использовать данные препараты в аграрном производстве для управления жизнедеятельностью растений [51, 52].

Исследования последних лет показали, что все больше химических веществ, продуцируемых растениями и микроорганизмами, способно регулировать метаболизм растений, что дает основания считать их гормоноподобными веществами [53]. Особое внимание с точки зрения регуляторных свойств стоит уделять вторичным метаболитам растений [53–55]. Например, некоторые фенольные соединения тормозят удлинение корней и побегов, прорастание семян и раскрытие почек [56, 57]. Известно, что ряд гликозидов (например, алифатический 3-гидроксипропилглюкозинолат) ингибируют рост корневой меристемы в физиологических концентрациях посредством регуляции неповрежденного пути мишени рапамицина [58], способны регулировать открытие устьиц [59], цирконуальные ритмы и время цветения растений [60, 61]. Некоторые терпеноиды способны регулировать рост и развитие и изменять фенотип. Например избыточное количество тритерпенового  $\beta$ -амирина у мутантов приводит к формированию более коротких корней и к значительно большему количеству корневых волосков, чем у растений дикого типа, однако его экзогенное внесение не приводит к подобному эффекту [62].

Фитогормоны и подобные им вещества регулируют все процессы жизнедеятельности растений, способны повышать их стрессоустойчивость и продуктивность [63–65], влияют на защиту от детоксикации тяжелыми металлами [66], участвуют в иммунных реакциях [67] и других регуляторных механизмах.

Кроме гормонов к регуляторам можно отнести гуминовые вещества (**ГВ**) (гуминовые кислоты, фульвовые кислоты и гумин) [7, 10], простые сахара, свободные аминокислоты [12], хитозан [13], летучие органические соединения (спирты, альдегиды, кетоны, углеводороды и пр.) [8, 9], витамины [11], активные формы кислорода (**АФК**) [11, 14] и пр., которые способны в определенных концентрациях изменять метаболические пути растений. Например, известно влияние редуцирующих сахаров (глюкозы, фруктозы, сахарозы и пр.) на процессы прорастания и редокс-метаболизм семян, при этом эффект прямо зависит от их концентрации [68–72]. В частности, показано стимулирующее действие экзогенной глюкозы в концентрации 0.5 ммоль/л на прорастающие се-

мена кукурузы и их антиоксидантный статус [71], но ингибирующие действие данного вещества в концентрации 110 ммоль/л [73]. Другой негормональный регулятор – хитозан в низких дозах (5 мкг/мл) способствует активации процессов прорастания семян [74], а в высоких дозах (0.5–2.0 мг/мл) может существенно тормозить рост и развитие растений преимущественно за счет действия на корни, увеличивая накопление ауксинов, снижая экспрессию генов, связанных с фактором транскрипции *WOX5* в апикальной меристеме, и останавливая рост корней, способствует увеличению количества **АФК** [75].

### ФИЗИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

В основе физических регуляторов лежат физические явления, многие из которых составляют основу среды обитания живых организмов (температура, свет, звук и пр.), а другие физические явления либо не встречаются в биоценозах, либо встречаются частично и при незначительной интенсивности действия, например, ультразвук, магнитное воздействие, некоторые диапазоны электромагнитного излучения (**ЭМИ**) (например, крайне высокочастотное излучение (**КВЧ**)) и т.п. [76–80]. Факторы, которые являются основой биотопа, можно использовать как регуляторы за счет диапазона и структуры, а экосистемно не связанные факторы – за счет их комплексного действия в определенных дозах.

В основе агрохимического применения физических факторов лежат описанные в литературе механизмы регулирования роста и развития растений. Реакция растений на **ЭМИ** осуществляется за счет фитохромной системы, которая регулирует широкий спектр физиологических процессов – от прорастания семян до цветения и плодоношения, контролирует развитие ответных реакций растений на действие различных экологических, в том числе, стрессовых факторов [80–82]. Считается, что в основе функционирования фитохромов лежит способность влиять на активность ферментов, регулирующих различные метаболические процессы, в том числе биосинтез пигментов, экспрессию генов, клеточный сигналинг и т.д. [83]. Ключевым физическим регулятором является свет, т.к. за счет него регулируются как классические физиологические процессы, такие как фотосинтез, движение, биосинтез основных питательных веществ и пр., так и менее изученные, например, альтернативный сплайсинг, развитие устьичного аппарата, биосинтез и накопление вторичных метаболитов и т.п. [84–89].

Еще одним физическим фактором, который можно рассматривать как регулятор, можно назвать электромагнитные поля (ЭМП). Известно, что они вызывают биологические эффекты в широком диапазоне амплитуд, частот и т.д. [90], при этом предполагают, что указанные поля могут влиять на циркадные ритмы растений, с чем связано их влияние на прорастание семян и рост растений [91]. Показано влияние слабых электромагнитных полей на концентрацию ионов кальция в клетках *Arabidopsis thaliana*, что фактически позволяет влиять на процессы транспорта и рецепции клеток [92], а это в свою очередь усиливает анаболические процессы. В частности, продемонстрировано влияние ЭМП с частотой 105 ГГц на усиление образования эпидермальных меристем в прорастающих семенах *Linum usitatissimum* L. [93]. Уменьшение интенсивности ЭМП при воздействии на *Arabidopsis thaliana* вызывало задержку перехода к цветению, что обусловлено подавлением генов, связанных с данным процессом [94]. Имеются данные о влиянии ЭМП на редокс-статус растений. Например, при действии ЭМП на проростки гороха с частотой 15 Гц и индукцией 1.5 мТл относительно контроля (нормальные условия, наличие только геомагнитного поля 47–50 мкТл) способствовало снижению содержания гидропероксидов на 18–22% (30- и 120-минутная обработка соответственно), пероксида водорода – на 12–20% и к снижению активности каталазы [95]. При действии ЭМП с частотой 100 Гц и индукцией 3.5 мТл было зафиксировано стойкое снижение содержания продуктов перекисного окисления липидов (ПОЛ) и усиление активности супероксиддисмутазы (СОД) [96].

Регулирующее воздействие могут оказывать электрические поля. Например, при воздействии на ткань картофеля импульсным электрическим полем напряженностью от 30 до 500 В/см с одним прямоугольным импульсом длительностью в 1 мс было установлено снижение проницаемости клеточной стенки [97].

Большой интерес вызывает использование акустических воздействий, в особенности ультразвука, в качестве регулятора. Имеются достаточные данные, показывающие его регуляторное воздействие на показатели прорастания семян [98, 99]. Продемонстрирована способность ультразвука снижать действие тяжелых металлов после обработки им растений за счет активации экспрессии генов факторов транскрипции некоторых стресс-гормонов, таких как абсцизовая (АБК) и салициловая (СК) кислоты, что приводило к усилению их биосинтеза и адаптации к стрессу, вызванному токсическим действием тяжелых

металлов [100]. Физиологическое действие ультразвука имеет достаточно широкий диапазон, например, известна способность ультразвука генерировать АФК в водных растворах [101], влиять на активность ферментов [102], усиливать мембранную проницаемость [103], экспрессию генов [100, 104, 105] и конформацию биомолекул [103, 106, 107]. При этом отмечено как активирующее влияние ультразвука на ряд вышеуказанных процессов, так и ингибирующее.

## БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Биологическими регуляторами можно считать организмы, формирующие устойчивое взаимодействие с растениями за счет обмена продуктами метаболизма, преимущественно химическими веществами. Организмы, способные взаимодействовать с растениями, представлены обширной группой биообъектов, в том числе различными бактериями и археями, водорослями, простейшими животными, микромицетами, актиномицетами, высшими грибами, беспозвоночными животными и пр. [17, 108, 109]. С агрохимической точки зрения наиболее перспективными объектами, которые можно использовать в качестве биологических регуляторов, являются микроорганизмы преимущественно прокариотической природы, в том числе ризобактерии [109]. К наиболее изученным симбионтам относятся: *Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp., *Enterobacter* sp., *Klebsiella* sp., *Azobacter* sp., *Variovorax* sp., *Azospirillum* sp., *Serratia* sp., *Azotobacters* sp., симбиотические грибы и пр. [16, 18]. Механизмы взаимодействия микроорганизмов с растениями включают регулирование гормонального и пищевого баланса, индуцирование устойчивости к патогенам и абиотическим стрессам и преобразование питательных веществ для легкого усвоения их растениями [17, 109], при этом они должны обладать высокой ризосферной компетентностью, усиливать рост растений, иметь широкий спектр действия, быть безопасными для окружающей среды, быть совместимыми с другими ризобактериями, быть устойчивыми к теплу, УФ-излучению, окислителям и другим негативным воздействиям [110]. Микроорганизмы продуцируют различные фитогормоны [111], сидерофоры [112], летучие органические соединения [8, 9, 113, 114], ферменты (рассматриваемые как биопестициды) [115], преобразуют питательные вещества (например, увеличивая доступность элементов минерального питания) [116] и участвуют в детоксикации ксенобиотиков [117], что в свою очередь способствует усилению симбиотических связей с растениями. Накоплены

данные, указавшие на то, что классические растительные сигналы, такие как ауксины и цитокинины, могут продуцироваться микроорганизмами для эффективной колонизации корня и модуляции архитектуры корневой системы, а сигнальные молекулы, например, N-ацил-L-гомосеринлактоны, которые используются бактериями для межклеточной коммуникации, могут восприниматься растениями для модуляции экспрессии генов, метаболизма и роста [15].

### КОМПЛЕКСНЫЕ РЕГУЛЯТОРЫ

В рамках данной работы комплексные регуляторы рассматриваются как сложные композиции, состоящие из смеси разных химических веществ, и (или) содержащие биологические организмы разных видов, при этом регулирующим свойством могут обладать только некоторые из компонентов. Комплексными регуляторами выступают различные остатки растительного или животного происхождения, навоз, компосты, микробные сообщества ризосферы, пищеварительного тракта животных, экстракты растений, грибов, тканей животных, продукты их жизнедеятельности и т.п. Многие из вышеперечисленных регуляторов рассматриваются в агрохимической науке и практике в качестве органических удобрений или биостимуляторов. Как уже отмечено ранее, в агрохимии нет единого подхода в классификации регуляторов [18, 22, 23, 118]. Например, регуляторы могут быть классифицированы на основе различий сырья, используемого для их получения, в основе которого могут быть микроорганизмы, морские водоросли, высшие растения, отходы животных, грибы, сапрпель, гуматсодержащее сырье и пр. [119]. Похожий принцип классификации регуляторов основан на том, что их можно сгруппировать на основе однокомпонентных или многокомпонентных составов и классифицировать по происхождению активного ингредиента и его способу действия [120]. Другая, принципиально отличающая классификация основана на механизме действия регулятора, а не на составе сырья [121]. Таким образом, потенциальные регуляторы могут быть сосредоточены во многих органических продуктах [120, 122, 123].

Грибы также могут служить источником регуляторов, а следовательно, на их основе можно получать различные композиции, в том числе экстракты, вытяжки, компосты и пр. Об этом по меньшей мере свидетельствует тот факт, что многие грибы синтезируют регуляторные метаболиты и являются симбионтами растений [18, 124–126]. Продукты некоторых микромицетов используют

в качестве веществ, обладающих протекторным и регулирующим свойством (например триходермин) [127]. Одним из механизмов регуляции растительного метаболизма грибами является биосинтез элиситоров, которые связываются с растениями, запуская внутриклеточные защитные реакции [128], однако этот механизм не до конца изучен. Предполагают, что элиситор связывается с рецептором, вызывая трансдукцию сигнала с участием нескольких сигнальных систем, в том числе фитогормонов, ионов  $Ca^{2+}$ , G-белков, фосфолипаз, НАДФН-оксидазы, АФК и т.д. [129–131].

Наибольшее сосредоточение, как качественное, так и количественное, регуляторов, может быть именно в органических удобрениях [132]. Органические удобрения занимают особое место в производстве продукции сельскохозяйственных растений, они играют важную биосферную роль, являясь по сути источником органо-минеральных компонентов не только для продуцентов, но и источником питания для редуцентов, которые играют важнейшую роль в поддержании баланса в агроэкосистемах [133]. С хозяйственной точки зрения органические удобрения способствуют увеличению урожая [134–136], позволяют поддерживать естественное плодородие почв [137, 138], управлять процессами онтогенеза растений [139, 140], способствуют адаптации к стрессовым воздействиям [141], увеличивают количество полезных веществ в растениях [142], а также могут обладать протекторным антиинфекционным действием [143]. Основными функциональными компонентами органических удобрений, содержащих регуляторы, являются: разлагающиеся массы органического вещества, свободные аминокислоты, ГВ (фульвовые, гуминовые кислоты и гуматы), карбоновые, жирные кислоты, простые сахара, минеральные компоненты и ряд других веществ в зависимости от их природы [120, 144].

### МЕХАНИЗМ ДЕЙСТВИЯ РЕГУЛЯТОРОВ

Существует 2 основных способа действия регуляторов, в зависимости от их природы, т.е. химической (включая химические, биологические и комплексные регуляторы) и физической (включая физические, биологические и комплексные регуляторы). В основе общих механизмов действия регуляторов преимущественно лежит их способность вызывать раздражения клеточных рецепторов как напрямую, так и опосредованно, вызывая определенные изменения в естественной регуляторной системе растений [3, 145–147], (табл. 1). В свою очередь эти изменения сказыва-

**Таблица 1.** Место регуляторов роста и развития растений в естественной регуляторной системе [1–3, 18, 25, 37–39, 53–55, 83, 88, 89, 103, 107, 148–152, 161, 168]

№	Система регуляции и интеграции растений	Механизмы действия регуляторов роста и развития
1	Ферментативная	Регуляторы способны оказать прямое и косвенное действие на активность ферментов. Прямое действие оказывается как за счет аллостерического взаимодействия регуляторов с ферментами, тем самым регуляторы могут выступать в качестве ферментативных ингибиторов и активаторов, так и способствовать посттрансляционным модификациям (ПТМ) молекул ферментов. Косвенное воздействие приводит к изменению концентрации фермента ввиду его биосинтеза или распада и фактически является следствием генетической системы регуляции.
2	Генетическая	Наиболее сложная система взаимодействия растения с регуляторами. Они действуют в двух направлениях, т.е. влияют на репликацию и транскрипцию. В случае репликации регуляторы способствуют клеточному делению, росту, развитию, а в случае транскрипции оказывают влияние на уровень экспрессии определенных генов активируя или подавляя их, а также на запуск альтернативных путей реализации генетической информации (альтернативные сайты инициации транскрипции, альтернативный сплайсинг, альтернативное полиаденилирование РНК). Воздействия могут оказываться на всех путях генетического регулирования: упаковка ДНК, метилирование, образование факторов транскрипции, регуляторных РНК и др.
3	Мембранная	Данный тип регуляции связан с регулированием мембранного транспорта, запуском аутофагических процессов, изменением конформации рецепторов.
4	Сигнальная	Наиболее развитая система межклеточного взаимодействия. Тесно связана с мембранами их рецепторами и каналами, ферментами и генами. В основе данного типа регулирования лежат сигнальные молекулы.
4.1	Гормональная	Гормоны взаимодействуют с рецептором, запуская каскад внутриклеточных реакций, приводящих к глобальному изменению экспрессии генов, что обуславливает направление метаболизма клетки.
4.2	Не гормональная	Регулирует определенные процессы клеточного метаболизма и способны менять локально метаболические пути, к ним, в частности, относятся: АФК, летучие органические вещества, гуминовые вещества и т.п.
5	Трофическая	Данный способ тесно связан с сигнальной регуляцией. В его основе лежат трофические молекулы (как органической, так и минеральной природы), изменение концентраций которых информирует клетку об изменении условий и запускает ряд адаптационных механизмов ответа, таким образом регулирует рост и развитие растений. Например, при нехватке сахаров снижается количество АТФ и накапливается цАМФ, что информирует клетку о голоде.
6	Электрофизиологическая	Изменение мембранного потенциала и потенциала действия под действием регуляторов лежит в основе быстрых адаптационных реакций на действие различных факторов. Например, открытие и закрытие устьиц, синтез защитных веществ и т.д.

ются на клеточном метаболизме и запускают межклеточные коммуникации путем формирования сигналов различной природы (гидравлических, химических, электрических), приводящих к изменению ростовых, онтогенетических, адаптационных, защитных и иных реакций растительного организма [18, 148–152].

Регуляторы разной природы (рассмотренные выше) воздействуют на растения несколькими способами, однако данное воздействие запускает единые механизмы ответа (рис. 2). Химические регуляторы воздействуют на клетку либо создавая возбуждение через взаимодействие с рецепторами, либо проникая внутрь клетки, вызывая мета-

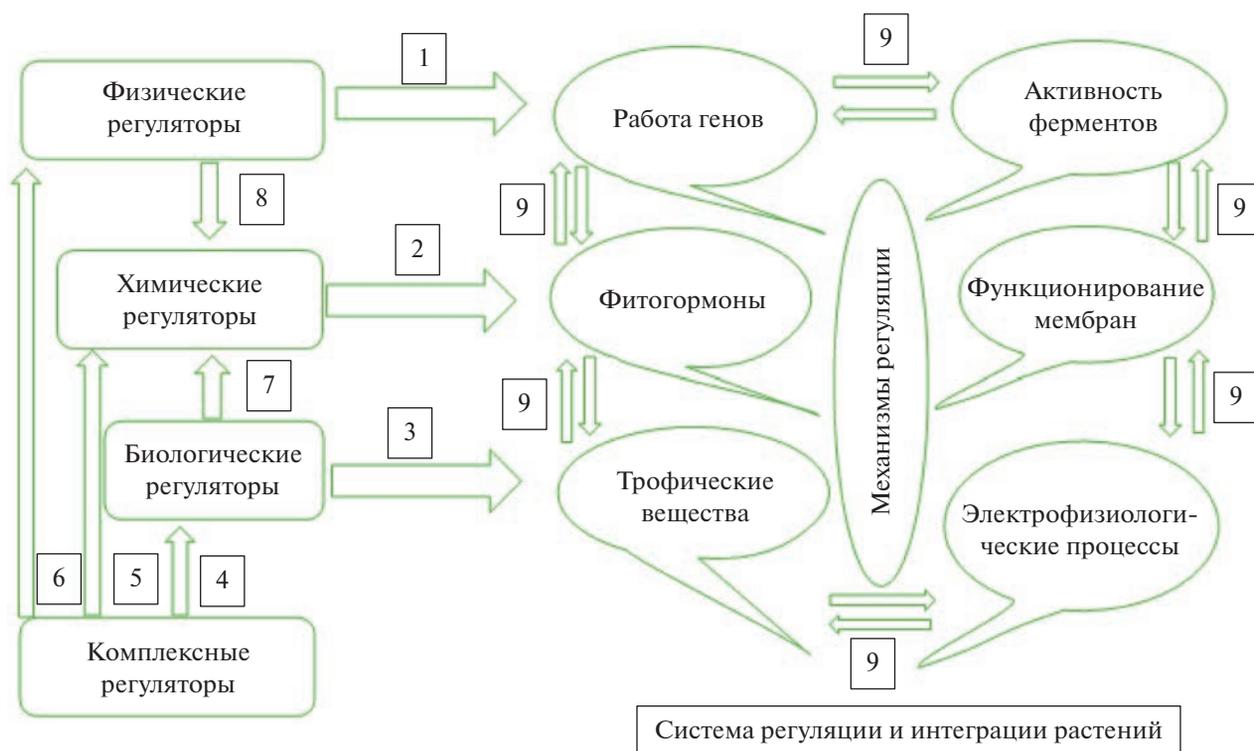


Рис. 2. Взаимодействие экзогенных регуляторов роста и развития растений с естественной системой регуляции и интеграции (обозначения в тексте).

болические изменения путем регулирования работы генетического аппарата, структуры и РНК, активности ферментов (рис. 2 (2)) запуская биохимические и молекулярно-генетические каскады реакций, приводящих к внутриклеточным изменениям (адаптации к стрессу, активации роста, запуску репликации ДНК и клеточного деления и т.д.), а также генерации межклеточных сигналов, что способствует межтканевой интеграции [11, 75, 148, 153–157]. Регуляторы физической природы также способны действовать 2-мя способами, напрямую вызывать раздражение растительных структур, например, фитохромов, мембранной проницаемости или статолитов (рис. 2 (1)), так и образовать определенные химические вещества, которые являются сигнальными молекулами (например АФК) (рис. 2 (8)) [83, 88, 89, 91, 92]. Биологические регуляторы действуют преимущественно через химический путь (рис. 2 (7)), т.е. создают вещества, например, фитогормоны, которые взаимодействуют с рецепторами растений [15, 17, 109]. Однако возможно прямое раздражение растительных рецепторов молекулами в составе организма, являющегося биологическим регулятором, что запускает ответные реакции (например, активацию иммунитета) (рис. 2 (3)) [158–160]. Биологические регуляторы также спо-

собны генерировать электрические сигналы, и таким образом оказывать влияние на растения через физические регуляторные пути [161]. Комплексные регуляторы ввиду своей сложной структуры способны воздействовать на растения всеми вышеупомянутыми способами (рис. 2 (4, 5, 6)). Независимо от метаболического пути, инициированного регулятором, растительная система регуляции и интеграции будет взаимодействовать между собой (рис. 2 (9)), что синхронизирует метаболизм в многоклеточном организме и способствует максимально эффективному ответу на действие раздражителя (в данном случае регулятора).

Большинство *PPP* действуют по пути запуска или ингибирования ростовых, онтогенетических или адаптационных процессов. Например, регулятор, являясь дополнительным раздражителем, напрямую или косвенно действует на рецептор, что усиливает возбуждение, тем самым запуская внутриклеточные взаимодействия, приводящие к изменению уровня экспрессии генов, и что в свою очередь меняет метаболические пути преимущественно за счет воздействия на ферментативную активность, и, с одной стороны, активизирует адаптационные механизмы, а с другой стороны, может усиливать или ингибировать



Рис. 3. Схема запуска метаболических путей в растениях регулятором роста и развития.

репликацию ДНК, клеточное деление, что приводит к изменению роста и развития растений (рис. 3). Таким образом действуют фитогормоны и подобные вещества. Возможны и альтернативные пути действия *PPP*, например, регуляторы химической природы могут, минуя рецептор, проникать в клетку и вызывать изменения в работе генетического аппарата, ферментативной активности, структурно-функциональной организации мембран и пр., что в свою очередь приводит к изменению адапционных, онтогенетических и ростовых процессов.

Изменения регуляторных контуров, вызываемые *PPP* на клеточном и органо-тканевом уровнях, запускают изменение интеграционных процессов, что приводит к сдвигу осцилляций доминирующих центров вследствие изменения полярностей и канализированных связей (рис. 2) [162–167].

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РЕГУЛЯТОРОВ

Применение *PPP* в растениеводстве является одним из флагманов развития сельского хозяйства, благодаря им возможно увеличение продуктивного потенциала агроценозов, повышение урожайности, устойчивости, улучшение показателей качества и увеличение сроков хранения сельскохозяйственной продукции. Однако не стоит забывать, что обработка растений различными регуляторами изменяет их метаболические пути и взаимодействия с окружающей средой, соответственно для получения оптимальных результатов при применении регуляторов от специалиста потребуются не просто работа по готовым лекалам, инструкциям и протоколам, но в первую очередь — глубокое понимание физиологических, биохимических, молекулярно-генетических процессов, проходящих в растениях и среде его обитания. Безусловно, перспективы эффективного применения регуляторов в агропромышленном комплексе зависят от глубокого понимания механизмов их действия, взаимодействия с естественной регуляторной системой растений и с экологическими факторами. Таким образом, понимание перспектив применения регуляторов и расширение сферы их применения требует в первую очередь изучения механизмов действия регуляторов и, во-вторых, выяснения метаболических путей, запускаемых определенными регуляторами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Регуляторы роста и развития растений представлены широким перечнем различных компонентов биосферы, которые могут быть как абиотической природы, относится к физическим или химическим компонентам, так и биотической природы. Механизм действия регуляторов связан с изменением естественных регуляторных систем: ферментативной, генетической, мембранной, сигнальной (в т.ч. гормональной), трофической или электрофизиологической, что приводит к активации или ингибированию ростовых, онтогенетических или адапционных процессов. В практической деятельности наиболее распространены являются комплексные регуляторы, получаемые на основе отходов АПК (растительного, животного, грибного происхождения или иного сырья), их механизм действия пока наиболее сложно объяснить и поэтому требует понимания их состава, в особенности компонентов, обладающих регуляторным действием.

Следует также отметить, что искусственное воздействие регуляторами на растения является серьезной процедурой, поэтому для получения ожидаемого положительного результата необходимо грамотное их применение. Также надо в обязательном порядке учитывать индивидуальные особенности растений, этап онтогенеза, наличие симбиотических связей и консорциев, условия обитания, обеспеченность элементами минерального и углеродного питания, наличие стрессоров и т.п. Без учета всего вышесказанного применение PPP не только не окажет должного влияния, но даже может навредить растениям, что скажется как на количестве, так и на качестве урожая.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Leivar P., Monte E.* PIFs: systems integrators in plant development // *Plant Cell*. 2014. V. 26. № 1. P. 56–78. <https://doi.org/10.1105/tpc.113.120857>
2. *Plant hormones: biosynthesis, signal transduction, action* / Ed. Davies P.J. Springer Science & Business Media, 2004. 750 p.
3. *Sparks E., Wachsmann G., Benfey P.N.* Spatiotemporal signalling in plant development // *Nat. Rev. Genet.* 2013. V.14. № 9. P. 631–644. <https://doi.org/10.1038/nrg3541>
4. *Went F.W.* Phytohormones: structure and physiological activity // *Arch. Biochem.* 1949. № 20 (1). P. 131–136.
5. *Яхин О.И., Лубянов А.А., Яхин И.А.* Современные представления о биостимуляторах // *Агрохимия*. 2014. № 7. С. 85–90.
6. *Яхин О.И., Лубянов А.А., Яхин И.А.* Классификация биостимуляторов // *Агрохимия*. 2018. № 3. С. 90–95. <https://doi.org/10.7868/S0002188118030122>
7. *Chambolle C.* Biostimulants: humus substances // *PHM Rev. Hortic.* 2005. V. 468. P. 21–23.
8. *Vespermann A., Kai M., Piechulla B.* Rhizobacterial volatiles affect the growth of fungi and *Arabidopsis thaliana* // *Appl. Environ. Microbiol.* 2007 V. 73. № 17. P. 5639–5641. <https://doi.org/10.1128/AEM.01078-07>
9. *Dunkel M., Schmidt U., Struck S., Berger L., Gruening B., Hossbach J., Jaeger I.S., Effmert U., Piechulla B., Eriksson R., Knudsen J., Preissner R.* SuperScent – a database of flavors and scents // *Nucleic Acids Res.* 2009 V. 37. (Database issue): D291–4. <https://doi.org/10.1093/nar/gkn695>
10. *Billard V., Etienne P., Jannin L., Garnica M., Cruz F., Garcia-Mina J.-M., Yvin J.-C., Ourry A.* Two biostimulants derived from algae or humic acid induce similar responses in the mineral content and gene expression of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) // *J. Plant Growth Regul.* 2014. V. 33. № 2. P. 305–316.
11. *Chen C., Twito S., Miller G.* New cross talk between ROS, ABA and auxin controlling seed maturation and germination unraveled in APX6 deficient *Arabidopsis* seeds // *Plant Signal Behav.* 2014. V. 9. № 12: e976489. <https://doi.org/10.4161/15592324.2014.976489>
12. *Lou Z., Sun Y., Bian S., Ali Baig S., Hu B., Xu X.* Nutrient conservation during spent mushroom compost application using spent mushroom substrate derived biochar // *Chemosphere*. 2017. № 169. P. 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.044>
13. *Bilbao-Sainz C., Chiou B.S., Williams T., Wood D., Du W.X., Sedej I., Ban Z., Rodov V., Poverenov E., Vinokur Y., McHugh T.* Vitamin D-fortified chitosan films from mushroom waste // *Carbohydr. Polym.* 2017. № 1 (167). P. 97–104. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.010>
14. *Mhamdi A., Van Breusegem F.* Reactive oxygen species in plant development // *Development*. 2018. V. 9. № 145 (15): dev164376. DOI: PMID: 30093413 <https://doi.org/10.1242/dev.164376>
15. *Ortiz-Castro R., Contreras-Cornejo H.A., Macías-Rodríguez L., López-Bucio J.* The role of microbial signals in plant growth and development // *Plant Signal Behav.* 2009 V. 4. № 8. P. 701–712. <https://doi.org/10.4161/psb.4.8.9047>
16. *Glick B.R.* Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications // *Scientifica (Cairo)*. 2012:963401. <https://doi.org/10.6064/2012/963401>
17. *Vejan P., Abdullah R., Khadiran T., Ismail S., Nasrulhaq Boyce A.* Role of plant growth promoting *Rhizobacteria* in agricultural sustainability—A Review // *Molecules*. 2016. V. 21. № 5. P. 573. <https://doi.org/10.3390/molecules21050573>
18. *Yakhin O.I., Lubyantsev A.A., Yakhin I.A., Brown P.H.* Biostimulants in plant science: A Global perspective // *Front Plant Sci.* 2017. № 7. P. 2049. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.02049>
19. *Jalal B., McNally R.J., Elias J.A., Potluri S., Ramachandran V.S.* Fake it till you make it! Contaminating Rubber Hands (“Multisensory Stimulation Therapy”) to treat obsessive–compulsive disorder // *Front Hum. Neurosci.* 2020. № 13. P. 414. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00414>
20. *Jacome Burbano M.S., Gilson E.* The Power of stress: The Telo-hormesis hypothesis // *Cells*. 2021. V. 10. № 5. P. 1156. <https://doi.org/10.3390/cells10051156>
21. *Brown P., Saa S.* Biostimulants in agriculture // *Front Plant Sci.* 2015. № 6. P. 671. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00671>
22. *Rouphael Y., Colla G.* Editorial: biostimulants in agriculture // *Front Plant Sci.* 2020 № 11. P. 40. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00040>
23. *Nephali L., Piater L.A., Dubery I.A., Patterson V., Huyser J., Burgess K., Tugizimana F.* Biostimulants for plant growth and mitigation of abiotic stresses: A Metabolomics perspective // *Metabolites*. 2020. V. 10. № 12. P. 505. <https://doi.org/10.3390/metabo10120505>
24. *Hasanuzzaman M., Parvin K., Bardhan K., Nahar K., Anee T.I., Masud A.A.C., Fotopoulos V.* Biostimulants for the regulation of reactive oxygen species metabolism in plants under abiotic stress // *Cells*. 2021. V. 10. № 10.

- P. 2537.  
<https://doi.org/10.3390/cells10102537>
25. Sun T., Zhang Y. MAP-kinase cascades in plant development and immune signaling // *EMBO Rep.* 2022. V. 23. № 2. e53817.  
<https://doi.org/10.15252/embr.202153817>
  26. Reinert J. Phytohormones // *Dtsch. Med. Wochenschr.* 1960. № 5 (85). P. 234–236.  
<https://doi.org/10.1055/s-0029-1209728>
  27. Zhao Y. Auxin biosynthesis and its role in plant development // *Annu. Rev. Plant Biol.* 2010. № 61. P. 49–64.  
<https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112308>
  28. Korasick D.A., Enders T.A., Strader L.C. Auxin biosynthesis and storage forms // *J. Exp. Bot.* 2013. V. 64. № 9. P. 2541–2555.  
<https://doi.org/10.1093/jxb/ert080>
  29. Zi J., Mafu S., Peters R.J. To gibberellins and beyond! Surveying the evolution of (di)terpenoid metabolism // *Annu. Rev. Plant Biol.* 2014. V. 65. P. 259–286.  
<https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050213-035705>
  30. Dubois M., Van den Broeck L., Inzé D. The Pivotal role of ethylene in plant growth // *Trends Plant Sci.* 2018. V. 23. № 4. P. 311–323.  
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.01.003>
  31. Hönig M., Plíhalová L., Husičková A., Nisler J., Doležal K. Role of cytokinins in senescence, antioxidant defence and photosynthesis // *Inter. J. Mol. Sci.* 2018. V. 19. № 12. P. 4045.  
<https://doi.org/10.3390/ijms19124045>
  32. Qin H., Huang R. Auxin controlled by ethylene steers root development // *Inter. J. Mol. Sci.* 2018. V. 19. № 11. P. 3656.  
<https://doi.org/10.3390/ijms19113656>
  33. Skalický V., Kubeš M., Napier R., Novák O. Auxins and cytokinins—the role of subcellular organization on homeostasis // *Inter. J. Mol. Sci.* 2018. V. 19. № 10. P. 3115.  
<https://doi.org/10.3390/ijms19103115>
  34. Sharma A., Zheng B. Molecular responses during plant grafting and its regulation by auxins, cytokinins, and gibberellins // *Biomolecules.* 2019. V. 9. № 9. P. 397.  
<https://doi.org/10.3390/biom9090397>
  35. Bidon B., Kabbara S., Courdavault V., Glévarec G., Oudin A., Héricourt F., Carpin S., Spíchal L., Binder B.M., Cock J.M., Papon N. Cytokinin and ethylene cell signaling pathways from prokaryotes to eukaryotes // *Cells.* 2020. V. 9. № 11. P. 2526.  
<https://doi.org/10.3390/cells9112526>
  36. Emenecker R.J., Strader L.C. Auxin-abscisic acid interactions in plant growth and development // *Biomolecules.* 2020. V. 10. № 2. P. 281.  
<https://doi.org/10.3390/biom10020281>
  37. Martignago D., Siemiatkowska B., Lombardi A., Conti L. Abscisic acid and flowering regulation: Many targets, different places // *Inter. J. Mol. Sci.* 2020. V. 21. № 24. P. 9700.  
<https://doi.org/10.3390/ijms21249700>
  38. Terceros G.C., Resentini F., Cucinotta M., Manrique S., Colombo L., Mendes M.A. The Importance of cytokinins during reproductive development in *Arabidopsis* and *Beyond* // *Inter. J. Mol. Sci.* 2020. V. 21. № 21. P. 8161.  
<https://doi.org/10.3390/ijms21218161>
  39. Ludwig-Müller J. Auxins in the right space and time regulate pea fruit development // *J. Exp. Bot.* 2022. V. 73. № 12. P. 3831–3835.  
<https://doi.org/10.1093/jxb/erac237>
  40. Betsuyaku S., Sawa S., Yamada M. The Function of the CLE peptides in plant development and plant–microbe interactions // *Arabidopsis Book.* 2011. № 9. e0149.  
<https://doi.org/10.1199/tab.0149>
  41. Штарк О.Ю., Шишова М.Ф., Повыдыш М.Н., Авдеева Г.С., Жуков В.А., Тихонович И.А. Стриголактоны – регуляторы симбиотрофии растений и микроорганизмов // *Физиология растений.* 2018. Т. 65. № 2. С. 83–100.  
<https://doi.org/10.7868/S001533031802001X>
  42. Aliche E.B., Screpanti C., De Mesmaeker A., Munnik T., Bouwmeester H.J. Science and application of strigolactones // *New Phytol.* 2020. V. 227. № 4. P. 1001–1011.  
<https://doi.org/10.1111/nph.16489>
  43. Janda T., Szalai G., Pál M. Salicylic acid signalling in plants // *Inter. J. Mol. Sci.* 2020. V. 21. № 7. P. 2655.  
<https://doi.org/10.3390/ijms21072655>
  44. Nolan T.M., Vukašinić N., Liu D., Russinova E., Yin Y. Brassinosteroids: multidimensional regulators of plant growth, development, and stress responses // *Plant Cell.* 2020. V. 32. № 2. P. 295–318.  
<https://doi.org/10.1105/tpc.19.00335>
  45. Li M., Yu G., Cao C., Liu P. Metabolism, signaling, and transport of jasmonates // *Plant Commun.* 2021. V. 2. № 5. P. 100231.  
<https://doi.org/10.1016/j.xplc.2021.100231>
  46. Yu X.J., Sun J., Zheng J.Y., Sun Y.Q., Wang Z. Metabolomics analysis reveals 6–benzylaminopurine as a stimulator for improving lipid and DHA accumulation of *Aurantiochytrium* sp // *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 2016. V. 91. № 4. P. 1199–1207.  
<https://doi.org/10.1002/jctb.4869>
  47. Xu F., Fan Y., Miao F., Hu G.R., Sun J., Yang G., Li F.L. Naphthylacetic acid and tea polyphenol application promote biomass and lipid production of nervonic acid–producing microalgae // *Front Plant Sci.* 2018. № 9. P. 506.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00506>
  48. Hu C., Zhao H., Shi J., Li J., Nie X., Yang G. Effects of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid on cucumber fruit development and metabolism // *Inter. J. Mol. Sci.* 2019. V. 20. № 5. P. 1126.  
<https://doi.org/10.3390/ijms20051126>
  49. Kaźmierczak A., Kunikowska A., Doniak M., Kornaś A. Mechanism of kinetin-induced death of *Vicia faba* ssp. minor root cortex cells // *Sci. Rep.* 2021. V. 11. № 1. P. 23746.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-03103-3>
  50. Liu Z., Wang Y., Pu W., Zhu H., Liang J., Wu J., Hong L., Guan P., Hu J. 4-CPA (4-chlorophenoxyacetic acid) induces the formation and development of defective “Fenghou” (*Vitis vinifera* × *V. labrusca*) grape seeds // *Biomolecules.* 2021. V. 11. № 4. P. 515.  
<https://doi.org/10.3390/biom11040515>

51. *Шерстнева О.Н., Сурова Л.М., Сеницына Ю.В., Агеева М.Н., Середнева Я.В., Воденев В.А., Сухов В.С.* Влияние фитогормонов и их аналогов на прорастание семян и морфометрические показатели проростков // Совр. пробл. науки и образ. 2015. № 6. С. 604.
52. *Kuznetsova O., Vlasenko E.* Effect of natural and synthetic phytohormones on growth and development of higher basidiomycetes // *Biotechnol. Acta.* 2020. Т. 13. № 5. С. 19–31.
53. *Erb M., Kliebenstein D.J.* Plant secondary metabolites as defenses, regulators, and primary metabolites: The Blurred functional trichotomy // *Plant Physiol.* 2020. V. 184. № 1. P. 39–52.  
<https://doi.org/10.1104/pp.20.00433>
54. *Hoang B.X., Shaw D.G., Levine S., Hoang C., Pham P.* New approach in asthma treatment using excitatory modulator // *Phytother Res.* 2007. V. 21. № 6. P. 554–557.  
<https://doi.org/10.1002/ptr.2107>
55. *Lee J., Jung J., Son S.H., Kim H.B., Noh Y.H., Min S.R., Park K.H., Kim D.S., Park S.U., Lee H.S., Kim C.Y., Kim H.S., Lee H.K., Kim H.* Profiling of the major phenolic compounds and their biosynthesis genes in *Sophora flavescens* Aiton // *Sci. World J.* 2018. № 1. P. 6218430.  
<https://doi.org/10.1155/2018/6218430>
56. *Brown D.E., Rashotte A.M., Murphy A.S., Normanly J., Tague B.W., Peer W.A., Taiz L., Muday G.K.* Flavonoids act as negative regulators of auxin transport in vivo in *Arabidopsis* // *Plant Physiol.* 2001. V. 126. № 2. P. 524–535.  
<https://doi.org/10.1104/pp.126.2.524>
57. *Rasouli H., Farzaei M.H., Mansouri K., Mohammadzadeh S., Khodarahmi R.* Plant cell cancer: May natural phenolic compounds prevent onset and development of plant cell malignancy? A Literature review // *Molecules.* 2016. V. 21. № 9. P. 1104.  
<https://doi.org/10.3390/molecules21091104>
58. *Malinovsky F.G., Thomsen M.F., Nintemann S.J., Jagd L.M., Bourguin B., Burrow M., Kliebenstein D.J.* An evolutionarily young defense metabolite influences the root growth of plants via the ancient TOR signaling pathway // *Elife.* 2017. № 6. e29353.  
<https://doi.org/10.7554/eLife.29353>
59. *Salehin M., Li B., Tang M., Katz E., Song L., Ecker J.R., Kliebenstein D.J., Estelle M.* Auxin-sensitive Aux/IAA proteins mediate drought tolerance in *Arabidopsis* by regulating glucosinolate levels // *Nat. Commun.* 2019. V. 10. № 1. P. 4021.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-12002-1>
60. *Kliebenstein D.J., Lambrix V.M., Reichelt M., Gershenzon J., Mitchell-Olds T.* Gene duplication in the diversification of secondary metabolism: tandem 2-oxoglutarate-dependent dioxygenases control glucosinolate biosynthesis in *Arabidopsis* // *Plant Cell.* 2001. V. 13. № 3. P. 681–693.  
<https://doi.org/10.1105/tpc.13.3.681>
61. *Atwell S., Huang Y.S., Vilhjálmsson B.J., Willems G., Horton M., Li Y., Meng D., Platt A., Tarone A.M., Hu T.T., Jiang R., Mulyati N.W., Zhang X., Amer M.A., Baxter I., Brachi B., Chory J., Dean C., Debieu M., de Meaux J., Ecker J.R., Faure N., Kniskern J.M., Jones J.D., Michael T., Nemri A., Roux F., Salt D.E., Tang C., Todesco M., Traw M.B., Weigel D., Marjoram P., Borevitz J.O., Bergelson J., Nordborg M.* Genome-wide association study of 107 phenotypes in *Arabidopsis thaliana* inbred lines // *Nature.* 2010. V. 465 (7298). P. 627–631.  
<https://doi.org/10.1038/nature08800>
62. *Kemen A.C., Honkanen S., Melton R.E., Findlay K.C., Mugford S.T., Hayashi K., Haralampidis K., Rosser S.J., Osbourn A.* Investigation of triterpene synthesis and regulation in oats reveals a role for  $\beta$ -amyryn in determining root epidermal cell patterning // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 2014. V. 111. № 23. P. 8679–8684.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1401553111>
63. *Verma V., Ravindran P., Kumar P.P.* Plant hormone-mediated regulation of stress responses // *BMC Plant Biol.* 2016. № 14. P. 86.  
<https://doi.org/10.1186/s12870-016-0771-y>
64. *Ullah A., Manghwar H., Shaban M., Khan A.H., Akbar A., Ali U., Ali E., Fahad S.* Phytohormones enhanced drought tolerance in plants: a coping strategy // *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2018. V. 25. № 33. P. 33103–33118.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-018-3364>
65. *Ciura J., Kruk J.* Phytohormones as targets for improving plant productivity and stress tolerance // *J. Plant Physiol.* 2018. № 229. P. 32–40.  
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.06.013>
66. *Kopittke P.M.* Role of phytohormones in aluminium rhizotoxicity // *Plant Cell Environ.* 2016. V. 39. № 10. P. 2319–2328.  
<https://doi.org/10.1111/pce.12786>
67. *Collum T.D., Culver J.N.* The impact of phytohormones on virus infection and disease // *Curr. Opin. Virol.* 2016. № 17. P. 25–31.  
<https://doi.org/10.1016/j.coviro.2015.11.003>
68. *Ling T.F., Xuan W., Fan Y.R., Sun Y.G., Xu S., Huang B.K., Huang S.R., Shen W.B.* The effect of exogenous glucose, fructose and NO donor sodium nitroprusside (SNP) on rice seed germination under salt stress // *Zhi Wu Sheng Li Yu Fen Zi Sheng Wu Xue Xue Bao.* 2005. V. 31. № 2. P. 205–212.
69. *Yuan K., Wysocka-Diller J.* Phytohormone signalling pathways interact with sugars during seed germination and seedling development // *J. Exp. Bot.* 2006. V. 57. № 12. P. 3359–3367.  
<https://doi.org/10.1093/jxb/erl096>
70. *Zhu G., Ye N., Zhang J.* Glucose-induced delay of seed germination in rice is mediated by the suppression of ABA catabolism rather than an enhancement of ABA biosynthesis // *Plant Cell Physiol.* 2009. V. 50. № 3. P. 644–651.  
<https://doi.org/10.1093/pcp/pcp022>
71. *Zhao Y., Yang K.J., Li Z.T., Zhao C.J., Xu J.Y., Hu X., Shi X.X., Ma L.F.* Alleviation of salt stress during maize seed germination by presoaking with exogenous sugar // *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao.* 2015. V. 26. № 9. P. 2735–2742.
72. *Sami F., Yusuf M., Faizan M., Faraz A., Hayat S.* Role of sugars under abiotic stress // *Plant Physiol. Biochem.* 2016. V. 109. P. 54–61.  
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.09.005>

73. *To J.P., Reiter W.D., Gibson S.I.* Mobilization of seed storage lipid by *Arabidopsis* seedlings is retarded in the presence of exogenous sugars // *BMC Plant Biol.* 2002. V. 2. P. 4. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-2-4>
74. *Li R., He J., Xie H., Wang W., Bose S.K., Sun Y., Hu J., Yin H.* Effects of chitosan nanoparticles on seed germination and seedling growth of wheat (*Triticum aestivum* L.) // *Inter. J. Biol. Macromol.* 2019. V. 126. P. 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.118>
75. *Lopez-Moya F., Escudero N., Zavala-Gonzalez E.A., Esteve-Bruna D., Blázquez M.A., Alabadí D., Lopez-Llorca L.V.* Induction of auxin biosynthesis and WOX5 repression mediate changes in root development in *Arabidopsis* exposed to chitosan // *Sci. Rep.* 2017. V. 7. № 1. P. 16813. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16874-5>
76. *Sanchez S.E., Cagnola J.I., Crepy M., Yanovsky M.J., Casal J.J.* Balancing forces in the photoperiodic control of flowering // *Photochem. Photobiol. Sci.* 2011. V. 10. № 4. P. 451–460. <https://doi.org/10.1039/c0pp00252f>
77. Орлов Б.Н., Авзалов Р.Х., Гуцин П.Я., Чурмасов А.В., Казаков А.В. Биоритмы и электромагнитные колебания. М.: Капитал Принт, 2011. 320 с.
78. *Chew Y.H., Wilczek A.M., Williams M., Welch S.M., Schmitt J., Halliday K.J.* An augmented *Arabidopsis* phenology model reveals seasonal temperature control of flowering time // *New Phytol.* 2012. V. 194. № 3. P. 654–665. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04069.x>
79. *Maffei M.E.* Magnetic field effects on plant growth, development, and evolution // *Front Plant Sci.* 2014. V. 5. P. 445. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00445>
80. *Kong S.G., Okajima K.* Diverse photoreceptors and light responses in plants // *J. Plant Res.* 2016. V. 129. № 2. P. 111–114. <https://doi.org/10.1007/s10265-016-0792-5>
81. *Carvalho R.F., Campos M.L., Azevedo R.A.* The role of phytochrome in stress tolerance // *J. Integr. Plant Biol.* 2011. V. 53. № 12. P. 920–929. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2011.01081.x>
82. *Kreslavski V.D., Kosobryukhov A.A., Schmitt F.J., Semenova G.A., Shirshikova G.N., Khudyakova A.Y., Al-lakhverdiev S.I.* Photochemical activity and the structure of chloroplasts in *Arabidopsis thaliana* L. mutants deficient in phytochrome A and B // *Protoplasma.* 2017. V. 254. № 3. P. 1283–1293. <https://doi.org/10.1007/s00709-016-1020-9>
83. *Inagaki N., Kinoshita K., Kagawa T., Tanaka A., Ueno O., Shimada H., Takano M.* Phytochrome B mediates the regulation of chlorophyll biosynthesis through transcriptional regulation of ChlH and GUN4 in rice seedlings // *PLoS One.* 2015. V. 10. № 8. e0135408. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135408>
84. *Kami C., Lorrain S., Hornitschek P., Fankhauser C.* Light-regulated plant growth and development // *Curr. Top. Dev. Biol.* 2010. № 91. P. 29–66. [https://doi.org/10.1016/S0070-2153\(10\)91002-8](https://doi.org/10.1016/S0070-2153(10)91002-8)
85. *Zhang H., Lin C., Gu L.* Light regulation of alternative pre-mRNA splicing in plants // *Photochem. Photobiol.* 2017. V. 93. № 1. P. 159–165. <https://doi.org/10.1111/php.12680>
86. *Xu C., Zhang Y., Yu Y., Li Y., Wei S.* Suppression of *Arabidopsis* flowering by near-null magnetic field is mediated by auxin // *Bioelectromagnetics.* 2018. V. 39. № 1. P. 15–24. <https://doi.org/10.1002/bem.22086>
87. *Morales A., Yin X., Harbinson J., Driever S.M., Moleenaar J., Kramer D.M., Struik P.C.* In Silico analysis of the regulation of the photosynthetic electron transport chain in C-3 plants // *Plant Physiol.* 2018. V. 176. № 2. P. 1247–1261. <https://doi.org/10.1104/pp.17.00779>
88. *Wei H., Kong D., Yang J., Wang H.* Light regulation of stomatal development and patterning: shifting the paradigm from *Arabidopsis* to grasses // *Plant Commun.* 2020. V. 1(2). P. 100030. <https://doi.org/10.1016/j.xplc.2020.100030>
89. *Xiang S., Wu S., Jing Y., Chen L., Yu D.* Phytochrome B regulates jasmonic acid-mediated defense response against *Botrytis cinerea* in *Arabidopsis* // *Plant Divers.* 2021. V. 44. № 1. P. 109–115. <https://doi.org/10.1016/j.pld.2021.01.007>
90. Ковальова О.В. Вплив електромагнітних полів і випромінювань на біооб'єкти (літературний огляд) // Актуальні питання біології, екології та хімії. 2020. Т. 1. № 1. С. 64–85.
91. *Ikeda S., Ukai K., Murase H., Fukuda H.* Effect of magnetic field for the circadian oscillation in plant root // *IFAC Proceed.* 2013. V. 46. № 4. P. 209–210.
92. *Pazur A., Rassadina V.* Transient effect of weak electromagnetic fields on calcium ion concentration in *Arabidopsis thaliana* // *BMC Plant Biol.* 2009. № 9 P. 47. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-9-47>
93. *Tafforeau M., Verdus M.C., Norris V., White G.J., Cole M., Demarty M., Thellier M., Ripoll C.* Plant sensitivity to low intensity 105 GHz electromagnetic radiation // *Bioelectromagnetics.* 2004. V. 25. № 6. P. 403–407. <https://doi.org/10.1002/bem.10205>
94. *Agliassa C., Narayana R., Berteau C.M., Rodgers C.T., Maffei M.E.* Reduction of the geomagnetic field delays *Arabidopsis thaliana* flowering time through downregulation of flowering-related genes // *Bioelectromagnetics.* 2018. V. 39. № 5. P. 361–374. <https://doi.org/10.1002/bem.22123>
95. Синуцына Ю.В., Середнева Я.В., Кальясова Е.А., Веселов А.П. Влияние комбинированного действия низкочастотного переменного магнитного поля и гипертермии на уровень гидропероксидов и ростовые реакции растений гороха // Изв. Уфим. НЦ РАН. 2018. № 3–5. С. 30–35.
96. *Половинкина Е.О., Кальясова Е.А., Синуцына Ю.В., Веселов А.П.* Изменение уровня перекисного окисления липидов и активности компонентов антиоксидантного комплекса в хлоропластах гороха при воздействии слабых импульсных магнитных полей // Физиология растений. 2011. Т. 58. № 6. С. 930–934.
97. *Galindo F.G., Vernier P.T., Dejmek P., Vicente A., Gundersen M.A.* Pulsed electric field reduces the permeability of potato cell wall // *Bioelectromagnetics.* 2008.

- V. 29. № 4. P. 296–301.  
<https://doi.org/10.1002/bem.20394>
98. Ding J., Johnson J., Chu Y. F., Feng H. Enhancement of  $\gamma$ -aminobutyric acid, avenanthramides, and other health-promoting metabolites in germinating oats (*Avena sativa* L.) treated with and without power ultrasound // Food Chem. 2019. V. 283. P. 239–247.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.136>
  99. Miano A.C., Sabadoti V.D., Augusto P.E.D. combining ionizing irradiation and ultrasound technologies: effect on beans hydration and germination // J. Food Sci. 2019. V. 84. № 11. P. 3179–3185.  
<https://doi.org/10.1111/1750-3841.14819>
  100. Bao G., Zhou Q., Li S., Ashraf U., Huang S., Miao A., Cheng Z., Wan X., Zheng Y. Transcriptome Analysis revealed the mechanisms involved in ultrasonic seed treatment-induced aluminum tolerance in peanut // Front Plant Sci. 2022. № 12. P. 807021.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.807021>
  101. Okada K., Kudo N., Hassan M.A., Kondo T., Yamamoto K. Threshold curves obtained under various gaseous conditions for free radical generation by burst ultrasound – Effects of dissolved gas, microbubbles and gas transport from the air // Ultras. Sonochem. 2009. V. 16. № 4. P. 512–518.  
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2008.11.010>
  102. Gebicka L., Gebicki J.L. The effect of ultrasound on heme enzymes in aqueous solution // J. Enzyme Inhib. 1997. V. 12. № 2. P. 133–141.  
<https://doi.org/10.3109/14756369709035814>
  103. Maresca D., Lakshmanan A., Abedi M., Bar-Zion A., Farhadi A., Lu G.J., Szablowski J.O., Wu D., Yoo S., Shapiro M.G. Biomolecular ultrasound and sonogenetics // Annu. Rev. Chem. Biomol. Eng. 2018. V. 9. P. 229–252.
  104. Ogawa R., Watanabe A., Morii A. Ultrasound up-regulates expression of heme oxygenase-1 gene in endothelial cells // J. Med. Ultrason. 2015. V. 42. № 4. P. 467–475.  
<https://doi.org/10.1007/s10396-015-0635-3>
  105. Hidvégi N., Gulyás A., Dobránszki J. Ultrasound, as a hypomethylating agent, remodels DNA methylation and alters mRNA transcription in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings // Physiol. Plant. 2022. V. 174. № 5. e13777.
  106. Jiang Z., Yao K., Yuan X., Mu Z., Gao Z., Hou J., Jiang L. Effects of ultrasound treatment on physicochemical, functional properties and antioxidant activity of whey protein isolate in the presence of calcium lactate // J. Sci. Food Agric. 2018. V. 98. № 4. P. 1522–1529.  
<https://doi.org/10.1002/jsfa.8623>
  107. Trakselyte-Rupsiene K., Juodeikiene G., Cernauskas D., Bartkiene E., Klupsaite D., Zadeike D., Bendoraitiene J., Damasius J., Ignatavicius J., Sikorskaite-Gudziuniene S. Integration of ultrasound into the development of plant-based protein hydrolysate and its biostimulatory effect for growth of wheat grain seedlings *in vivo* // Plants (Basel). 2021. V. 10. № 7. P. 1319.  
<https://doi.org/10.3390/plants10071319>
  108. Armada E., Portela G., Roldan A., Azcon R. Combined use of beneficial soil microorganism and agrowaste residue to cope with plant water limitation under semi-arid conditions // Geoderma. 2014. № 232. P. 640–648.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.06.025>
  109. Cantabella D., Dolcet-Sanjuan R., Teixidó N. Using plant growth-promoting microorganisms (PGPMs) to improve plant development under *in vitro* culture conditions // Planta. 2022. V. 255. № 6. P. 117.  
<https://doi.org/10.1007/s00425-022-03897-0>
  110. Nakkeeran S., Fernando W.G.D., Siddiqui Z.A. Plant growth promoting rhizobacteria formulations and its scope in commercialization for the management of pests and diseases // PGPR: Biocontrol and Biofertilization / Ed. Siddiqui Z.A. The Netherlands, Dordrecht: Springer, 2005. P. 257–296.
  111. Porcel R., Zamarreño Á.M., García-Mina J.M., Aroca R. Involvement of plant endogenous ABA in *Bacillus megaterium* PGPR activity in tomato plants // BMC Plant Biol. 2014. № 14. P. 36.  
<https://doi.org/10.1186/1471-2229-14-36>
  112. Flores-Félix J.D., Silva L.R., Rivera L.P., Marcos-García M., García-Fraile P., Martínez-Molina E., Mateos P.F., Velázquez E., Andrade P., Rivas R. Plants probiotics as a tool to produce highly functional fruits: the case of phyllobacterium and vitamin C in strawberries // PLoS One. 2015. V. 10. № 4. e0122281.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122281>
  113. Ryu C.M., Farag M.A., Hu C.H., Reddy M.S., Wei H.X., Paré P.W., Kloepper J.W. Bacterial volatiles promote growth in *Arabidopsis* // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 2003. V. 100. № 8. P. 4927–4932.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.0730845100>
  114. Kanchiswamy C.N., Malnoy M., Maffei M.E. Chemical diversity of microbial volatiles and their potential for plant growth and productivity // Front Plant Sci. 2015. № 6. P. 151.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00151>
  115. Kumar H., Bajpai V.K., Dubey R.C. Wilt disease management and enhancement of growth and yield of *Cajanus cajan* (L.) var. Manak by bacterial combinations amended with chemical fertilizer // Crop Protect. 2010. № 29. P. 591–598.  
<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.01.002>
  116. Choudhary D.K., Sharma K.P., Gaur R.K. Biotechnological perspectives of microbes in agro-ecosystems // Biotechnol. Lett. 2011. V. 33. № 10. P. 1905–1910.  
<https://doi.org/10.1007/s10529-011-0662-0>
  117. Ahmad M., Zahir Z.A., Khalid M. Efficacy of *Rhizobium* and *Pseudomonas* strains to improve physiology, ionic balance and quality of mung bean under salt-affected conditions on farmer's fields // Plant Physiol. Biochem. 2013. № 63. P. 170–176.  
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2012.11.024>
  118. Brown P., Saa S. Biostimulants in agriculture // Front Plant Sci. 2015. № 6. P. 671.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00671>
  119. Яхин О.И., Лубянов А.А., Яхин И.Ф. Физиологическая активность биостимуляторов и эффективность их применения // Агрохимия. 2016. № 6. С. 72–94.
  120. Basak A. Biostimulators-definitions, classification and legislation // Monographs Series: Biostimulators in

- Modern Agriculture. General Aspects. Warsaw: Wiesz Jutra, 2008. С. 7–17.
121. Bulgari R., Cocetta G., Trivellini A., Vernieri P., Ferrante A. Biostimulants and crop responses: a review // Biol. Agric. Hort. 2015. № 31. P. 1–17. <https://doi.org/10.1080/01448765.2014.964649>
  122. Белопухов С.Л., Дмитриевская И.И., Гришина Е.А. Физико-химические свойства органо-минерального комплекса из растительных остатков льняной костры // Агрохимия. 2016. № 6. С. 20–28.
  123. Титова В.И., Варламова Л.Д., Гейгер Е.Ю., Короленко И.Д. Оценка фитотоксичности порошка яичной скорлупы по ее влиянию на посевные качества семян различных сельскохозяйственных культур / Вестн. Рязан. ГАТУ им. П.А. Костычева. 2017. № 1. С. 47–53.
  124. González-González M.F., Ocampo-Alvarez H., Santacruz-Ruvalcaba F., Sánchez-Hernández C.V., Casarrubias-Castillo K., Becerril-Espinosa A., Castañeda-Nava J.J., Hernández-Herrera R.M. Physiological, ecological, and biochemical implications in tomato plants of two plant biostimulants: Arbuscular mycorrhizal fungi and seaweed extract // Front Plant Sci. 2020. № 11. P. 999. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00999>
  125. Torres N., Yu R., Kurtural S.K. Inoculation with mycorrhizal fungi and irrigation management shape the bacterial and fungal communities and networks in vineyard soils // Microorganisms. 2021. V. 9. № 6. P. 1273. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9061273>
  126. Saia S., Corrado G., Vitaglione P., Colla G., Bonini P., Giordano M., Stasio E.D., Raimondi G., Sacchi R., Roupheal Y. An Endophytic fungi-based biostimulant modulates volatile and non-volatile secondary metabolites and yield of greenhouse Basil (*Ocimum basilicum* L.) through variable mechanisms dependent on salinity stress level // Pathogens. 2021. V. 10. № 7. P. 797. <https://doi.org/10.3390/pathogens10070797>
  127. Chen H., Mao L., Zhao N., Xia C., Liu J., Kubicek C.P., Wu W., Xu S., Zhang C. Verification of *TRI3* acetylation of trichodermol to trichodermin in the plant endophyte *Trichoderma taxi* // Front Microbiol. 2021. № 12. P. 731425. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.731425>
  128. Тарчевский И.А. Сигнальные системы клеток растений. М.: Наука, 2002. 294 с.
  129. Namdeo A.G. Plant cell elicitation for production of secondary metabolites: a review // Pharmacogn. Rev. 2007. V. 1. № 1. P. 69–79.
  130. Лукаткин А.С., Семенова А.С., Лукаткин А.А. Влияние регуляторов роста на проявление токсического действия гербицидов на растения // Агрохимия. 2016. № 1. С. 73–95.
  131. Dias M.I., Sousa M.J., Alves R.C., Ferreira I.C.F.R. Exploring plant tissue culture to improve the production of phenolic compounds: a review // Ind. Crop. Prod. 2016. V. 82. P. 9–22.
  132. Luziatelli F., Ficca A.G., Colla G., Baldassarre Švecová E., Ruzzi M. Foliar application of vegetal-derived bioactive compounds stimulates the growth of beneficial bacteria and enhances microbiome biodiversity in lettuce // Front Plant Sci. 2019. № 10. P. 60. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00060>
  133. Moretti B., Bertora C., Grignani C., Lerda C., Celi L., Sacco D. Conversion from mineral fertilisation to MSW compost use: Nitrogen fertiliser value in continuous maize and test on crop rotation // Sci. Total. Environ. 2020. V. 705. P. 135308. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135308>
  134. Lim S.L., Wu T.Y., Lim P.N., Shak K.P. The use of vermicompost in organic farming: overview, effects on soil and economics // J. Sci. Food Agric. 2015. V. 95. № 6. P. 1143–1156. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6849>
  135. Liu Z., Rong Q., Zhou W., Liang G. Effects of inorganic and organic amendment on soil chemical properties, enzyme activities, microbial community and soil quality in yellow clayey soil // PLoS One. 2017. V. 12. № 3. e0172767. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172767>
  136. Hou M.M., Lü F.L., Zhang H.T., Zhou Y.T., Lu G.Y., Ayaz M., Li Q.H., Yang X.Y., Zhang S.L. Effect of organic manure substitution of synthetic nitrogen on crop yield and N<sub>2</sub>O emission in the winter wheat-summer maize rotation system // Huan Jing Ke Xue. 2018. V. 39. № 1. P. 321–330. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.201707010>
  137. Murrell E.G., Cullen E.M. Conventional and organic soil fertility management practices affect corn plant nutrition and *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera: Crambidae) larval performance // Environ. Entomol. 2014. Oct. 43 (5). P. 1264–1274. <https://doi.org/10.1603/EN14008>
  138. Yang S., Xiao Y.N., Xu J. Organic fertilizer application increases the soil respiration and net ecosystem carbon dioxide absorption of paddy fields under water-saving irrigation // Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 2018. V. 25. № 10. P. 9958–9968. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-1285-y>
  139. Ugena L., Hýlová A., Podlešáková K., Humplík J.F., Doležal K., Diego N., Spíchal L. Characterization of biostimulant mode of action using novel multi-trait high-throughput screening of *Arabidopsis* germination and rosette growth // Front Plant Sci. 2018. № 9. P. 1327. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01327>
  140. Masondo N.A., Kulkarni M.G., Finnie J.F., Van Staden J. Influence of biostimulants-seed-priming on *Ceratothera triloba* germination and seedling growth under low temperatures, low osmotic potential and salinity stress // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2018. № 147. P. 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.08.017>
  141. Campobenedetto C., Grange E., Mannino G., van Arkel J., Beekwilder J., Karlova R., Garabello C., Contaratese V., Berteza C.M. A Biostimulant seed treatment improved heat stress tolerance during cucumber seed germination by acting on the antioxidant system and glyoxylate cycle // Front Plant Sci. 2020. № 11. P. 836. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00836>
  142. Yook J.S., Kim M., Pichiah P.B., Jung S.J., Chae S.W., Cha Y.S. The Antioxidant properties and inhibitory effects on HepG2 cells of chicory cultivated using three different kinds of fertilizers in the absence and pres-

- ence of pesticides // *Molecules*. 2015. V. 20. № 7. P. 12061–12075.  
<https://doi.org/10.3390/molecules200712061>
143. *Pereira C., Dias M.I., Petropoulos S.A., Plexida S., Chrysargyris A., Tzortzakakis N., Calhelha R.C., Ivanov M., Stojković D., Soković M., Barros L., Ferreira I.* The Effects of biostimulants, biofertilizers and water-stress on nutritional value and chemical composition of two spinach genotypes (*Spinacia oleracea* L.) // *Molecules*. 2019. V. 24. № 24. P. 4494.  
<https://doi.org/10.3390/molecules24244494>
  144. *Monda H., Cozzolino V., Vinci G., Spaccini R., Piccolo A.* Molecular characteristics of water-extractable organic matter from different composted biomasses and their effects on seed germination and early growth of maize // *Sci. Total Environ*. 2017. V. 590–591. P. 40–49.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.026>
  145. *Iwamura H., Nishimura K., Fujita T.* Quantitative structure-activity relationships of insecticides and plant growth regulators: comparative studies toward understanding the molecular mechanism of action // *Environ. Health Perspect*. 1985. № 61. P. 307–320.  
<https://doi.org/10.1289/ehp.8561307>
  146. *Moffett A.S., Bender K.W., Huber S.C., Shukla D.* Allosteric control of a plant receptor kinase through S-glutathionylation // *Biophys. J*. 2017. V. 113. № 11. P. 2354–2363.  
<https://doi.org/10.1016/j.bpj.2017.08.059>
  147. *Shumilina J., Kusnetsova A., Tsarev A., Janse van Rensburg H.C., Medvedev S., Demidchik V., Van den Ende W., Frolov A.* Glycation of plant proteins: Regulatory roles and interplay with sugar signalling? // *Inter. J. Mol. Sci*. 2019. V. 20. № 9. P. 2366.  
<https://doi.org/10.3390/ijms20092366>
  148. *Zhang H., Liu Y., Wen F., Yao D., Wang L., Guo J., Ni L., Zhang A., Tan M., Jiang M.* A Novel rice C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-type zinc finger protein, ZFP36, is a key player involved in abscisic acid-induced antioxidant defence and oxidative stress tolerance in rice // *J. Exp. Bot*. 2014. V. 65. № 20. P. 5795–5809.  
<https://doi.org/10.1093/jxb/eru313>
  149. *Baldoni E., Genga A., Cominelli E.* Plant MYB transcription factors: Their role in drought response mechanisms // *Inter. J. Mol. Sci*. 2015. V. 6. № 7. P. 15811–15851.  
<https://doi.org/10.3390/ijms160715811>
  150. *Vodeneev V., Akinchits E., Sukhov V.* Variation potential in higher plants: Mechanisms of generation and propagation // *Plant Signal Behav*. 2015. V. 10. № 9. e1057365.
  151. *Sarwar R., Li L., Yu J., Zhang Y., Geng R., Meng Q., Zhu K., Tan X.L.* Functional characterization of the cystine-rich-receptor-like kinases (CRKs) and their expression response to *Sclerotinia sclerotiorum* and abiotic stresses in *Brassica napus* // *Inter. J. Mol. Sci*. 2022. V. 24. № 1. P. 511.  
<https://doi.org/10.3390/ijms24010511>
  152. *Hasanuzzaman M., Alhathloul H.A.S., Parvin K., Bhuyan M.H.M.B., Tanveer M., Mohsin S.M., Nahar K., Soliman M.H., Mahmud J.A., Fujita M.* Polyamine action under metal/metalloid stress: Regulation of biosynthesis, metabolism, and molecular interactions // *Inter. J. Mol. Sci*. 2019. V. 20. № 13. P. 3215.  
<https://doi.org/10.3390/ijms20133215>
  153. *Zhang X., Ervin E.H.* Cytokinin-containing seaweed and humic acid extracts associated with creeping bentgrass leaf cytokinins and drought resistance // *Crop Sci*. 2004. V. 44. № 5. P. 1737–1745.
  154. *Kiyosaki T., Matsumoto I., Asakura T., Funaki J., Kuroda M., Misaka T., Arai S., Abe K.* Gliadain, a gibberellin-inducible cysteine proteinase occurring in germinating seeds of wheat, *Triticum aestivum* L., specifically digests gliadin and is regulated by intrinsic cystatins // *FEBS J*. 2007. V. 274. № 8. P. 1908–1917.  
<https://doi.org/10.1111/j.1742-4658.2007.05749.x>
  155. *Wang L., Ruan Y.L.* Regulation of cell division and expansion by sugar and auxin signaling // *Front Plant Sci*. 2013. № 4. P. 163.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00163>
  156. *Vieira B.C., Bicalho E.M., Munné-Bosch S., Garcia Q.S.* Abscisic acid regulates seed germination of *Vellozia* species in response to temperature // *Plant Biol (Stuttg)*. 2017. V. 19. № 2. P. 211–216.  
<https://doi.org/10.1111/plb.12515>
  157. *Shuai H., Meng Y., Luo X., Chen F., Zhou W., Dai Y., Qi Y., Du J., Yang F., Liu J., Yang W., Shu K.* Exogenous auxin represses soybean seed germination through decreasing the gibberellin/abscisic acid (GA/ABA) ratio // *Sci. Rep*. 2017. V. 7. № 1. P. 12620.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-13093-w>
  158. *Erbs G., Newman M.A.* The role of lipopolysaccharide and peptidoglycan, two glycosylated bacterial microbe-associated molecular patterns (MAMPs), in plant innate immunity // *Mol. Plant Pathol*. 2012. V. 13. № 1. P. 95–104.  
<https://doi.org/10.1111/j.1364-3703.2011.00730.x>
  159. *Tanaka K., Nguyen C.T., Liang Y., Cao Y., Stacey G.* Role of LysM receptors in chitin-triggered plant innate immunity // *Plant Signal Behav*. 2013. V. 8. № 1. e22598.  
<https://doi.org/10.4161/psb.22598>
  160. *Trdá L., Boutrot F., Claverie J., Brulé D., Dorey S., Poinssot B.* Perception of pathogenic or beneficial bacteria and their evasion of host immunity: pattern recognition receptors in the frontline // *Front Plant Sci*. 2015. № 6. P. 219.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00219>
  161. *Martínez-Corral R., Liu J., Prindle A., Süel G.M., Garcia-Ojalvo J.* Metabolic basis of brain-like electrical signalling in bacterial communities // *Philos. Trans R. Soc. Lond. B. Biol. Sci*. 2019. V. 374. № 1774. P. 20180382.  
<https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0382>
  162. *Nohales M.A., Kay S.A.* Molecular mechanisms at the core of the plant circadian oscillator // *Nat. Struct. Mol. Biol*. 2016. V. 23. № 12. P. 1061–1069.  
<https://doi.org/10.1038/nsmb.3327>
  163. *Andres J., Blomeier T., Zurbriggen M.D.* Synthetic switches and regulatory circuits in plants // *Plant Physiol*. 2019. V. 179. № 3. P. 862–884.  
<https://doi.org/10.1104/pp.18.01362>
  164. *Du S., Chen L., Ge L., Huang W.* A Novel loop: Mutual regulation between epigenetic modification and the

- circadian clock // *Front Plant Sci.* 2019. № 10. P. 22.  
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00022>
165. McClung C.R. The Plant circadian oscillator // *Biology (Basel)*. 2019. V. 8. № 1. P. 14.  
<https://doi.org/10.3390/biology8010014>
166. Webb A.A.R., Seki M., Satake A., Caldana C. Continuous dynamic adjustment of the plant circadian oscillator // *Nat. Commun.* 2019. V. 10. № 1. P. 550.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-019-08398-5>
167. Perianez-Rodríguez J., Rodríguez M., Marconi M., Bustillo-Avenidaño E., Wachsmann G., Sanchez-Corrienero A., De Gernier H., Cabrera J., Perez-García P., Gude I., Saez A., Serrano-Ron L., Beeckman T., Benfey P.N., Rodríguez-Patón A., Del Pozo J.C., Wabnik K., Moreno-Risueno M.A. An auxin-regulable oscillatory circuit drives the root clock in *Arabidopsis* // *Sci. Adv.* 2021. V. 7. № 1. eabd4722.  
<https://doi.org/10.1126/sciadv.abd4722>
168. Stephani M., Picchianti L., Gajic A., Beveridge R., Skarwan E., Sanchez de Medina Hernandez V., Mohseni A., Clavel M., Zeng Y., Naumann C., Matuszkiewicz M., Turco E., Loeffke C., Li B., Dürnberger G., Schutzbieter M., Chen H.T., Abdrakhmanov A., Savova A., Chia K.S., Djamei A., Schaffner I., Abel S., Jiang L., Mechtler K., Ikeda F., Martens S., Clausen T., Dagdas Y. A cross-kingdom conserved ER-phagy receptor maintains endoplasmic reticulum homeostasis during stress // *Elife*. 2020. № 9. e58396.  
<https://doi.org/10.7554/eLife.58396>

## Plant Growth and Development Regulators: Classification, Nature and Mechanism of Action

S. S. Tarasov<sup>a,#</sup>, E. V. Mikhalev<sup>a</sup>, A. I. Rechkin<sup>a</sup>, and E. K. Krutova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Nizhny Novgorod State Agricultural Academy  
 prosp. Gagarina 97, Nizhny Novgorod 603022, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: tarasov\_ss@mail.ru*

Questions of the nature and mechanism of action of plant growth and development regulators (hereinafter referred to as regulators) are considered. It is proposed to use the classification of regulators depending on their original nature. Four groups of regulators are distinguished: pure chemicals, physical, biological and complex regulators. Attention is paid to the mechanisms of the relationship of artificial regulators with the natural system of regulation and integration of plants.

*Keywords:* plant growth and development regulators, bioregulators, biofertilizers, organic fertilizers, plant regulation and integration system, phytohormones, cell signaling systems.

УДК 631.81:630:630\*161.15

## ПРИМЕНЕНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ И УГЛЕРОДНЫЙ БЮДЖЕТ ЛЕСОВ<sup>§</sup>

© 2023 г. Д. Г. Щепашенко<sup>1,2,\*</sup>, Л. В. Мухортова<sup>3</sup>, О. В. Мартыненко<sup>4</sup>, В. Н. Коротков<sup>5</sup>, В. Н. Карминов<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Международный институт прикладного системного анализа  
А-2361 Лаксенбург, Шлоссплатц, 1, Австрия

<sup>2</sup>Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН  
117997 Москва, ул. Профсоюзная, стр. 14, 84/32, Россия

<sup>3</sup>Институт леса им. В.Н. Сукачёва Сибирского отделения РАН  
660036 Красноярск, Академгородок, 50 (28), Россия

<sup>4</sup>Всероссийский институт повышения квалификации руководящих работников и специалистов лесного хозяйства  
141202 Пушкино, Московская обл., ул. Институтская, 17, Россия

<sup>5</sup>Институт глобального климата и экологии им. Акад. Ю.А. Израэля  
107258 Москва, ул. Глебовская, 20Б, Россия

<sup>6</sup>Мытищинский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана  
141005 Мытищи, ул. 1-я Институтская, 1, Россия

\*E-mail: schepd@iiasa.ac.at

Поступила в редакцию 12.03.2023 г.

После доработки 18.04.2023 г.

Принята к публикации 14.06.2023 г.

Поглощение и сохранение углерода является одной из важных экосистемных функций леса. Современной науке ставится задача изучить возможности усилить данную функцию с целью противостояния росту концентрации углекислого газа в атмосфере. Лесохозяйственные мероприятия, в частности применение минеральных удобрений, являются эффективным способом увеличения производительности лесов и усиления их углерод-поглощающей способности. Данный обзор ставит целью обобщить накопленный опыт применения минеральных удобрений в бореальных и умеренных лесах. Сделан вывод о том, что внесение удобрений должно быть избирательным, и оно наиболее эффективно в сочетании с другими лесоводственными мероприятиями. Значительный эффект наблюдают в средних по продуктивности условиях местопроизрастания с достаточным, но не избыточным увлажнением, в возрасте максимального текущего прироста общей или деловой древесины (40–70 лет для хвойных пород). Наиболее популярными (недорогими, но эффективными) являются N-удобрения, однако необходимо контролировать содержание прочих элементов питания, в частности P, K и В. Нами собрана и опубликована база данных многолетних экспериментов по внесению минеральных удобрений. Эксперименты показали, что поглощение 1 т CO<sub>2</sub> требует от 5.6 до 10.3 кг (в среднем 7.2) азота. Результаты проекта применения удобрений должны сравниваться с базовой линией (без проекта), а разница может быть засчитана в единицах сокращения выбросов.

*Ключевые слова:* азот, фосфор, калий, прирост, поглощение углерода, рост леса, депонирование углерода.

DOI: 10.31857/S0002188123090107, EDN: VXZFDL

### ВВЕДЕНИЕ

Стабилизацию уровня концентрации парниковых газов в атмосфере признают одним из

условий снижения опасного антропогенного воздействия на климатическую систему планеты [1]. На международном уровне Киотский протокол и Парижское соглашение запустили рыночный механизм регулирования выбросов парниковых газов. Глобальный процесс торговли квотами на выбросы парниковых газов на национальном, региональном или международном рынках обуславливает необходимость поиска путей сниже-

<sup>§</sup> Работа выполнена в рамках реализации инновационного проекта государственного значения “Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах” (рег. № 123030300031-6).

ния и компенсации выбросов парниковых газов в различных отраслях экономики.

Одним из самых рентабельных способов секвестрации углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) является поглощение его растениями в процессе фотосинтеза и депонирование в фитомассе и мертвом органическом веществе. С этой точки зрения леса рассматривают как наиболее перспективные природные системы, поскольку в древесной растительности углерод может депонироваться на десятки и сотни лет. На территории России леса занимают 815 млн га [2], кроме того, имеется большое количество заброшенных и зарастающих сельскохозяйственных земель [3], которые также могут быть использованы для целей лесовыращивания. По оценкам разных авторов, леса на территории нашей страны в фоновом режиме ежегодно поглощают от 91 до 692 млрд т С [4]. В масштабах страны – это огромный вклад в климатическую систему Земли, который может быть еще более увеличен за счет развития и усовершенствования методов ведения лесного хозяйства.

Цель обзора – рассмотрение возможностей увеличения углерод-депонирующей и углерод-консервирующей роли лесов за счет применения удобрений в лесном хозяйстве. Традиционно минеральные удобрения в лесном хозяйстве использовали для увеличения скорости роста и продукции стволовой древесины, усиления плодоношения, повышения устойчивости грибным заболеваниям и повреждениям насекомыми, для восстановления нарушенных почв [5, 6]. Однако применение удобрений и мелиорантов способно помочь и в достижении цели увеличения углерод-депонирующих функций лесных экосистем:

- ускорение роста леса (и, соответственно, поглощения  $\text{CO}_2$ ) путем внесения тех элементов питания растений, которых не хватает в почве, может увеличить запасы фитомассы и мертвого органического вещества в экосистемах;

- увеличение размеров заготавливаемых на этапе рубки деревьев позволяет увеличить долю выхода из древесины продуктов долговременного пользования (например, пиловочника, в отличие от дров и сырья для производства бумаги). Долговременные продукты из древесины консервируют углерод на более длительный срок. Например, средний период полураспада пиломатериалов составляет 35 лет в отличие от целлюлозно-бумажной продукции – 2 года [5];

- повышение устойчивости насаждений к неблагоприятным факторам. Сбалансированность элементов питания повышает устойчивость рас-

тений к вредителям и болезням, что в свою очередь снижает риск потери углерода;

- восстановление бедных или нарушенных почв. Увеличение продуктивности леса приведет к увеличению отпада и накоплению органического углерода в почве, что способно привести к более долговременной его консервации по сравнению с накоплением в фитомассе.

Интенсивность роста леса и накопление углерода зависит от множества факторов, включая климатические условия, обеспеченность водой и элементами питания, внешних природных и антропогенных воздействий, а также от породного состава и возраста древостоев. В том случае, если все прочие факторы благоприятствуют росту, обеспеченность элементами минерального питания становится определяющей, а восполнение их недостатка способно существенно повысить продуктивность древостоев и углерод-депонирующие возможности лесных экосистем.

## ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ НА ЛЕСНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

Рост и продуктивность древостоя тесно связаны с наличием макро- и микроэлементов в почве. В бореальных и умеренных лесах дефицит азота (N) широко распространен [6, 7] и обычно снижает продуктивность древостоя за счет уменьшения площади листовой поверхности, светопропускания и меньшей скорости фотосинтеза [8, 9]. Поскольку индекс листовой поверхности (*LAI*) в древостое тесно связан с чистой первичной продукцией (*NPP*), низкая доступность N может существенно снижать прирост и секвестрацию углерода в северных лесах [9]. По этой причине N является элементом, наиболее часто применяемым при удобрении лесов [10]. Удобрение лесов азотом на не плодородных участках обычно увеличивает фитомассу всех компонентов (листья, древесины и корней) [11–13], что часто усиливается при одновременном внесении и других элементов питания [14, 15].

Хотя реакция прироста на однократное внесение удобрений обычно длится менее 10 лет, внесение удобрений может повысить долгосрочную продуктивность деградированных участков. Например, питательные вещества, внесенные в сосновые насаждения, созданные на обедневших сельскохозяйственных землях, обычно становятся постоянным компонентом питательного капитала участка [16]. Положительное влияние N-удобрений на рост деревьев следующего поколения наблюдали на лесных плантациях даже через 25 лет после последнего внесения удобрений и

через 10 лет после рубки главного пользования [17, 18].

Многие исследователи считают эффективным мероприятием по повышению устойчивости лесов к техногенному загрязнению внесение в почву минеральных удобрений и ее известкование, что способствует улучшению минерального питания, установлению оптимального соотношения ионов в почве, улучшению состояния и роста древесных пород [19]. Как показывает опыт, минеральные удобрения улучшают состояние и рост лесов, ослабленных высокой рекреационной нагрузкой [20], способствуют увеличению устойчивости древостоев против вредителей и болезней [21], а также против неблагоприятных климатических условий, например, засухи [22]. Таким образом, удобрения являются важным экологическим фактором, повышающим устойчивость, улучшающим рост и состояние лесных насаждений, ослабленных в результате неблагоприятных природных или антропогенных воздействий [23].

Многие исследователи считают, что чистая продуктивность экосистемы (*NEP*) — баланс углерода в экосистеме — чаще всего повышалась в ответ на применение удобрений, аналогично *NPP*. Однако, учитывая, что *NEP* является составным показателем, его величина зависит от направления и относительной величины реакции *NPP* и гетеротрофного дыхания (*RH*) на применение удобрений и доступность почвенной влаги. Увеличение *NEP* в ответ на внесение удобрений происходит с участием 2-х механизмов, действующих в противоположных направлениях: *NPP* увеличивается с внесением удобрений, в то время как общее дыхание почвы (*RS*) и *RH* часто снижаются [24]; это может быть вызвано изменением схемы распределения углерода, когда растения дают меньше тонких корней, более низкой микробной биомассой и изменениями в составе микробного сообщества и почвенных ферментов, с последующим снижением гетеротрофной активности [25].

В большинстве случаев присутствие в составе растительного сообщества азотфиксаторов (ольха — *Alnus glutinosa* L. Gaertn., *Alnus rubra* Bong.) вызывало существенное (от 20 до 100%) повышение содержания углерода и азота в почве [26–28]. Смешанные насаждения с включением видов, способных к симбиотической азотфиксации, целесообразно создавать для восстановления полноценного питательного режима почв [29, 30].

Скандинавские страны были одними из первых, где массово применяли удобрения для управления продуктивностью бореальных лесов. В Норвегии удобрение насаждений ели европей-

ской (*Picea abies* (L.) H. Karst.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) началось в 1930-х гг. [31]. Общая цель норвежской программы удобрения заключалась в том, чтобы: 1 — увеличить производство древесины и связанную с этим экономическую прибыль за счет сокращения оборотов рубки, 2 — предотвратить дефицит предложения древесины, который, согласно прогнозам, должен был возникнуть в начале 21-го века из-за неравномерного распределения древостоев по возрастным классам [31]. Объемы внесения N-удобрений в лесах Норвегии варьировали в 1990–2018 гг. от 73 до 839 т N/год [32].

В Швеции промышленное применение удобрений началось в 1960-х гг. Лесная промышленность рассматривала удобрения как рентабельное решение своих проблем с поставками древесины [33, 34].

В Финляндии в 1960–1980-х гг. применяли государственные субсидии на использование удобрений в лесах, и в течение этого периода были удобрены леса на общей площади 3.2 млн га. После отмены субсидий применение удобрений сократилось до 20 тыс. га/год [35]. По данным национальной отчетности [32], за 1990–2018 гг. внесение удобрений варьировало от 1.1 до 7.0 тыс. т азота. Внесение удобрений рекомендуется в этом случае для насаждений со средним уровнем плодородия почв в приспевающих древостоях, чтобы добавление азота не увеличивало ветвистость и сучковатость ствола [1, 36, 37].

В США удобрения используют для ускорения роста лесов и при лесоразведении. В 1990 г. было внесено с удобрениями 13.2 тыс. т N, в 2018 г. — 73.5 тыс. т N. В отдельные годы объемы внесения удобрений достигали 83.5 тыс. т азота (2000 г.) [38]. В Великобритании используют удобрения при посадке леса на бедных почвах и при рекультивации отвалов [32].

В 1970-х гг. в Канаде была запущена обширная программа [39, 40], которая включала 79 стандартизованных экспериментов по изучению влияния удобрений на рост хвойных древостоев. Использовали разные дозы N-удобрений, совместное внесение N и фосфорных (P) удобрений или N и калийных (K) удобрений и одновременное внесение всех трех элементов (NPK). Показано, что 57% экспериментов показали статистически значимый отклик прироста на внесение удобрений, при этом наибольший эффект давало внесение азота. Реакция на внесение удобрений значительно отличалась для разных древесных видов. Наибольший дополнительный прирост наблюдали для сосны Банкса (*Pinus banksiana* Lamb.) допол-

нительно от 5.8 до 23.3 м<sup>3</sup>/га, что составляло 24–5% [39, 40]. Не было обнаружено статистически значимой реакции пихты (*Abies balsamea* (L.) Mill.) на внесение удобрений, что могло быть связано с большим возрастом древостоев, повышенным отпадом и существенной исходной вариабельностью приростов и запасов древесины. Ответы на внесение удобрений в насаждениях ели красной (*Picea rubens* Sarg.) продемонстрировали изменение запаса за 10 лет от –3 до +29% или от –1.4 до +13.4 м<sup>3</sup>/га по сравнению с контролем. В очень густых насаждениях периодические потери с отпадом в течение 10-ти лет наблюдения привели к отрицательным приростам [39–41]. Более подробные данные этого и других экспериментов собраны нами в базу данных [42].

По данным некоторых исследователей, N-удобрения увеличили производство стволовой древесины от 56 до 81% в еловых насаждениях в северной Финляндии при долговременном эксперименте по внесению N-удобрений (750–1160 кг/га за 5–6 приемов в течение 30-ти лет). Кроме того, заметно увеличилась фитомасса ветвей. После внесения N-удобрений на наиболее плодородных участках еловых насаждений на юге Финляндии эффект от внесения азота был намного меньше, т.к. сказывался недостаток P и бора [35]. Долговременный эксперимент по внесению N-удобрений (596–746 кг N/га за 5–6 приемов в течение 26–30 лет) в сосновых лесах Финляндии показал увеличение стволовой древесины к возрасту рубки на 22–36% и фитомассы ветвей на 12–25% [35, 43].

В отечественной практике лесного хозяйства удобрения в основном применяют в лесных питомниках при выращивании посадочного материала хозяйственно-ценных пород [44–46], несколько меньше – на постоянных лесосеменных участках (ПЛСУ), лесосеменных плантациях (ЛСП) с целью увеличения плодоношения плюсовых деревьев и получения семян высокого качества [47, 48]. Удобрение средневозрастных, припевающих и спелых лесных насаждений в пределах РФ проводили только в опытном порядке и небольшом объеме. В результате зонально-типологического подхода для отдельных регионов и лесорастительных зон были разработаны рекомендации, наставления, указания, инструкции по применению удобрений в лесных объектах [48–52], в которых дано обоснование применения удобрений в зависимости от типов леса, условий произрастания и других лесоводственных факторов и рекомендуется оптимальная технология их внесения [23].

## ВИДЫ И ФОРМЫ ПРИМЕНЯЕМЫХ УДОБРЕНИЙ

В лесоводственной практике удобрениями обычно восполняют недостаток одного или нескольких макроэлементов питания (например, N, P, K), или микроэлементов (например, B). На сильнокислых почвах применяют известковые материалы, содержащие Ca и Mg.

В отечественной практике в основном используют N-удобрения, т.к. большинство лесных почв, особенно занятых сосновыми насаждениями, бедны азотом [23, 53]. Из N-удобрений предпочтение отдается аммиачной селитре (N<sub>aa</sub>) и мочеvine (N<sub>m</sub>). Но некоторые авторы [47] считают N<sub>m</sub> менее эффективной по сравнению с N<sub>aa</sub>, известково-аммиачной селитрами или сульфатом аммония (N<sub>a</sub>) [23].

Наибольший эффект достигается внесением медленно растворимых форм удобрений и мелиорантов, высвобождение которых продолжается месяцы и даже годы. Карбамидо формальдегид (Ureaformaldehyde) – продукт конденсации N<sub>m</sub>, состоящий из полимеров разного размера, которые медленно разлагаются до аммония почвенными микроорганизмами. Общая концентрация N в гумусовом слое и доступность минерального N оставались на более высоком уровне после ее внесения по сравнению с внесением N<sub>m</sub> или N<sub>aa</sub> [35].

Из P-удобрений наиболее часто применяют суперфосфаты простой, двойной и фосфат-сырец [23]. Апатиты тонкого помола медленно растворяются и обеспечивают долговременный источник минерального питания. Внесение дозы P44 привело к повышению содержания растворимого P в верхних 0–5 см почвы через 3 мес., что сохранилось по сравнению с контролем и на 3-й год [35].

Из K-удобрений наиболее часто применяют хлористый калий, калийную соль и сульфат калия [23, 53]. В Канаде азот вносили в виде N<sub>m</sub>, фосфор – в виде тройного суперфосфата, калий – в виде хлорида калия [39, 40].

Для известкования применяют доломитовую муку, обожженный доломит, сланцевую золу, которые повышают концентрацию обменного кальция и магния, способствуют нейтрализации почвенной кислотности [53]. Нейтральные и слабокислые почвы, как правило, более плодородны по сравнению с кислыми. В частности, снижение кислотности способствует ускорению минерализации органического азота. Было доказано, что внесение даже небольших доз (2 т известняка/га)

приводило к снижению кислотности на 0.5 ед. рН даже через 20 лет после внесения [19].

Эксперименты по известкованию почв проводили в Финляндии перед посадкой лесных культур (2–4 т известняка/га с заделкой в почву или распылением по поверхности), а также в молодых и средневозрастных насаждениях (2 т известняка/га). Внесение извести в лесные почвы стимулирует также развитие микрофлоры, особенно аммонификаторов и целлюлозоразлагающих микроорганизмов [54, 55]. Древесные и травянистые растения реагируют на применение извести только через несколько лет после ее внесения. Это объясняется как очень слабой растворимостью самой извести, так и механизмом ее влияния на режим питания растений: известь через изменение жизнедеятельности микроорганизмов и грибов содействует разложению органического вещества и образованию доступных форм элементов минерального питания [56]. Использование удобрений, содержащих помимо кальция еще и магний, увеличивало прирост в высоту 20–30-летних культур сосны на 20–25% [57].

Однако действие извести на прирост древостоев неоднозначно. В Швеции сосновые и еловые древостои на хорошо дренированных минеральных почвах мало или совсем не реагировали на внесение извести [58], а в опытах, проведенных в Финляндии, действие извести в молодняках сосны часто было отрицательным [56, 59]. Известкование увеличивало долю мертвой микоризы на корнях ели, что частично объясняет снижение прироста ельников в связи со снижением поступления элементов питания через микоризу [35].

### ДОЗЫ, ПЕРИОДИЧНОСТЬ И СПОСОБЫ ВНЕСЕНИЯ УДОБРЕНИЙ

Важным элементом в технологии применения удобрений является установление оптимальных доз. Оптимальные дозы удобрений определяются почвенно-климатическими особенностями региона, условиями произрастания, типом леса, возрастом древостоев и видом удобрений. Некоторые исследователи считают, что для лесных пород разовые дозы  $N < 50$  кг/га – не эффективны, а  $> 300$  кг/га – вредны, т.к. причиняют ожоги деревьям или угнетающе действуют на их рост [60]. Тем не менее, частое внесение небольших доз удобрений (N и P) дают такой же биологический ответ, как и однократное внесение большой дозы при условии, что совокупные количества внесенных удобрений были сопоставимы [61].

Опыт свидетельствует, что в хвойных лесных насаждениях при однократном внесении удобре-

ний на минеральных почвах эффективны N-удобрения в дозах 150–200 кг/га, на осушенных болотных почвах – P- и K-удобрения и полные NPK, при этом однократные дозы P-удобрений составляют 120–150, K – 100–150, а N – 100 кг/га [49, 53, 60, 62, 63].

Анализ изменений запаса древесины в Онтарио (Канада) показал, что лучший результат достигался внесением  $N_{151}Mg_{62}$ , в результате чего объем древесины увеличивался дополнительно на  $16 \text{ м}^3/\text{га}$  за 10 лет [64].

Ускорение роста после применения N-удобрений в приспевающих хвойных лесах Финляндии наблюдали в течение 7–10 лет с максимумом на 3–4-й годы. При применении медленно растворяющихся удобрений эффект может быть существенно продлен, что улучшает равномерность прироста и качество древесины [35].

Ежегодное внесение как N-, так и NPK-удобрения в культуры сосны в Карелии, произрастающие на подзоле иллювиально-железистом песчаном, способствовало увеличению прироста массы древесины к 20–22-летнему возрасту в 5.7–10.7 раза при снижении ее плотности на 16–20%. Периодическое внесение удобрений через каждые 5 лет повлияло на прирост массы деревьев в меньшей степени (в 2.0–3.4 раза) и по-разному сказалось на плотности древесины: при применении полного удобрения плотность древесины снижалась, при внесении только азота – не изменялась [65].

По имеющимся данным [66], сроки внесения удобрений оказывают сильное влияние на степень использования удобрений лесными насаждениями, а также на экологические последствия от их применения. Большинство авторов отдают предпочтение весенним и раннелетним срокам внесения N-удобрений [21, 67, 68]. Некоторые данные [69] свидетельствуют о большей эффективности осенних подкормок. На практике используют оба срока внесения удобрений. С целью избежания загрязнения окружающей среды, газообразных потерь N и потерь от вымывания рекомендуется учитывать метеоусловия и вносить удобрения при температуре  $\geq 6-8^\circ\text{C}$  (для любых форм N-удобрений) и  $\leq 15^\circ\text{C}$  (для  $N_{aa}$ ) [51, 52].

Внесение N-удобрений весной или в начале лета, когда потребности в них максимальны, показало наибольшую эффективность [70]. Обильные осадки и таяние снега увеличивает вынос N, особенно если в это время нет активного потребления растениями. Время внесения не критично для удобрений с медленным высвобождением, например, мочевины формальдегида, апатита (apatite), биотита (biotite), P-удобрений (фосфо-

ритной муки, фосфат-сырца), но для получения эффекта в первый год внесения их следует применять до начала вегетации [35, 71].

В мировой и отечественной практике удобрения в лесных насаждениях вносят поверхностно без заделки в почву. Существует ручное, механизированное (с помощью наземной техники) и авиационное (использование самолетов, вертолетов) рассеивание удобрений [72, 73]. Ручной способ ограничен из-за исключительной трудоемкости и применяется только на небольших площадях [21, 53].

Шведские исследователи [68] пришли к выводу, что авиационное внесение экономически более оправдано, но не всегда обеспечивает равномерность распределения, и качество работ зависит от рассеивающей удобрения аппаратуры. Опыт показывает преимущество вертолетов, т.к. они обеспечивают бóльшую прицельность рассеивания удобрений, позволяют удобрять небольшие площади и не требуют организации взлетно-посадочной полосы [74, 75].

### ВЫБОР ОБЪЕКТА ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ

Аборигенные виды древесных растений, как правило, хорошо приспособились к климату и почвам и могут достаточно успешно расти в широком диапазоне условий произрастания. Внесение удобрений может принести требуемый эффект только при выраженном недостатке того или иного элемента питания. Чем больше недостаток элемента питания в почве, тем большее увеличение прироста можно ожидать при оптимальности прочих факторов роста. Недостаток элементов питания можно определить в результате анализа почв и хвои (листьев).

Древостои с низким показателем удельной площади листовой поверхности обычно сильнее реагируют на внесение удобрений, потому что они ограничены питательными веществами, тогда как насаждения с высокой удельной площадью листовой поверхности не ограничены элементами питания и поэтому практически не реагируют на внесение удобрений [16, 61, 76].

Существует необходимость учитывать верхний предел продуктивности лесов разных типов в различных природных условиях. Как показали исследования [77], дополнительные лесоводственные мероприятия, включая внесение удобрений, не приведут к увеличению продуктивности, если бонитет древостоев близок к максимальному в данном регионе.

Внесение N-удобрений не рекомендуется в экосистемах, где наблюдают поступление больших количеств N в результате его осаждения из атмосферы или предыдущего сельскохозяйственного использования земель, поскольку это может стимулировать потери N в виде нитратов в воде или в виде парниковых газов в результате денитрификации [78, 79].

Реакция на внесение удобрений, которая наблюдается у разных древесных видов и у одного и того же вида в значительной степени зависит от условий произрастания и характеристик насаждения (густоты, видового состава, размера и интенсивности роста деревьев) [14]. Эта реакция изменяется в зависимости от стадии развития древостоя [80, 81], от возможностей иммобилизации и минерализации питательных веществ после их внесения, т.е. зависит от свойств почвы [82].

Большие потери, связанные с естественным отпадом древостоя, могут маскировать реакцию на внесение удобрений [41]. Поэтому использование удобрений, вероятно, нежелательно в древостоях с высокой густотой, где может быть ожидаем большой естественный отпад деревьев, связанный с самоизреживанием.

Удобрения применяют в разные периоды жизни леса. В лесных питомниках их применяют для выращивания высококачественного посадочного материала. В молодняках, особенно в стадии жердняка, внесение минеральных удобрений ослабляет конкурентную борьбу и способствует выживанию ослабленных растений. Внесение дополнительных питательных веществ в средневозрастных и спелых древостоях может повысить их затухающий прирост. Кроме этого, внесение удобрений усиливает плодоношение древостоев и повышает их устойчивость к грибным заболеваниям и повреждениям насекомыми [56].

В отечественной научной литературе имеются данные о влиянии удобрений и комплексного ухода на процесс естественного возобновления под пологом леса [20, 63, 83, 84] и на вырубках [85]. Сообщается о влиянии удобрений и рубок ухода на высоту и диаметр подроста, в основном елового [83, 84]. В иностранной литературе отмечены высокая биологическая и экономическая эффективности применения удобрений, рыхления почвы, комплексного ухода, осушения для содействия естественному возобновлению леса [86, 87].

Удобрение способно увеличить рост молодых деревьев в 3–5 раз [88]. Сосновые молодняки на легких почвах (лишайниковые и черничные боры) могут увеличивать прирост по объему в 1.5–

2.0 раза [89], а прирост в высоту – в 1.4–2.5 раза. На бедных песчаных почвах наряду с N-удобрениями эффективно внесение K-удобрений [56]. В 13-летних сосняках Житомирской обл., произрастающих на супесчаной подзолистой почве, через 3 года после внесения удобрений, содержащих N, объем древесины увеличивался на 16–31%, а масса хвои – на 12–15%. Другие виды удобрений – P, K и известковые – практически не оказали влияния на рост сосны [90]. В Финляндии внесение удобрений в молодняках 1-го класса возраста было признано не эффективным по нескольким причинам: их потребности в элементах питания невелики и обеспечиваются разложением порубочных остатков; удобрения перехватываются подлеском и травянистыми растениями; ветви становятся более крупными, что ухудшает качество древесины [35]. В Канаде исследования показали, что если удобрения вносят только при посадке, то через 5–10 лет деревья растут примерно так же, как на неудобранных территориях [91].

Наибольший эффект удобрений на поглощение углерода наблюдается в возрасте, когда происходит максимальный текущий прирост древостоев. В сосняках и ельниках Финляндии этот возраст составляет 30–50 лет. Внесение 150 кг N/га позволяет увеличить запас на 12–20 м<sup>3</sup>/га [35].

Удобрение средневозрастных, приспевающих и спелых древостоев способно увеличить их прирост в высоту и в диаметре. Естественный прирост уменьшается с возрастом, снижается потребность в элементах питания и отзывчивость к применению удобрений. Однако применение удобрений в момент максимального прироста технической спелости (обычно за 10–20 лет до рубки) позволяет увеличить размеры стволов и качество древесины при заготовке. Это, в свою очередь, позволяет использовать большую долю древесины на изделия с длительным сроком службы и предотвращать возврат углерода в атмосферу на значительное время [35, 92, 93]. В этом случае за счет удобрений можно получить дополнительный прирост древесины за период их действия до 20–30 м<sup>3</sup>/га [23, 53, 94], с самой высокой окупаемостью затрат за короткий срок. В зарубежной практике она составляет 8–10 долларов прибыли на 1 затраченный доллар [58, 95–97] в отечественной практике и в ближнем зарубежье – 1.5–8.0 руб. на 1 руб. затрат [49, 98–100].

Мета-анализ реакции древостоев на применение удобрений показал, что древостои ели черной (*Picea mariana* (Mill.)), формирующиеся на участках хорошего и отличного качества, демонстрируют значимые ( $p < 0.05$ ) и устойчивые положи-

тельные ответы на внесение азота (дозы N84–140) и 2NP или (дозы N196–252) + (дозы P84–140) (т.е. среднее увеличение составило: площади поперечных сечений – на 22.6, общего запаса – на 16.9 и запаса деловой древесины – на 17.9%); участки низкого и среднего качества демонстрировали в основном незначительную (или) непостоянную реакцию на внесение удобрений (т.е. значимую ( $p < 0.05$ )), средняя площадь поперечных сечений увеличилась на 12.6% ( $p < 0.05$ ) только при применении удобрений в количестве 2N (дозы N196–252) и 2 NPK (N196–252) + (P84–140) + (K84–140) (при  $p < 0.05$ ) [101].

Древостои сосны Банка, произрастающие на участках хорошего качества, показали значительную ( $p < 0.05$ ) и устойчивую реакцию на все 5 вариантов обработок, в среднем увеличение составило: площади сечений – на 17.3, общего запаса – на 15.4 и объема деловой древесины на 14.5%. Участки среднего качества достоверно и устойчиво реагировали на внесение N, 2N, 2NK и 2NPK, наблюдали: среднее увеличение площади сечений – на 28.3, общего запаса – на 22.1 и объема деловой древесины – на 22.7%. Участки низкого качества показали значительный ( $p < 0.05$ ) и последовательный ответ на применение 2NK и 2NPK (т.е. в среднем увеличение составило: площади сечений – на 23.5, общего запаса древесины – на 19.5 и объема деловой древесины на 19.5%) [101].

Список типов леса в порядке убывания эффективности применения N-удобрений в Финляндии выглядит следующим образом: сосняки брусничные–ельники черничные–ельники кисличные. Закономерности, связанные с типами леса в северной и южной Финляндии, проявляются одинаково, но эффект в центральной Финляндии на 20–40% меньше по сравнению с южными районами [35].

Сомкнутость насаждений в значительной степени определяет реакцию на внесение удобрений, при этом насаждение со средней плотностью обеспечивает пространство, необходимое для увеличения площади листьев, кроны и улучшения фотосинтетического потенциала после внесения питательных веществ [80, 102]. Загущенные насаждения могут плохо реагировать на удобрения из-за высокой скорости самоизреживания и повышенного отпада деревьев 2-го яруса, что снижает чистый прирост фитомассы в древостое [41, 102]. В некоторых случаях прореживание перед внесением удобрений улучшает реакцию, предоставляя пространство для расширения кроны и увеличивая ресурсы (например, свет, влажность почвы), необходимые для того, чтобы

оставленные деревья могли в полной мере использовать увеличившиеся количества питательных веществ [103–105]. С помощью такой комбинации ухода можно улучшить рост отдельных деревьев, однако общая продукция биомассы насаждений снижается на определенный период из-за более низкой сомкнутости насаждений после прореживания [105–107].

Для положительной реакции роста на внесение макроудобрений (NPK) в северных лиственных лесах иногда требуется дополнительное внесение известковых удобрений [108, 109]. В лесах восточной части Северной Америки с кислыми почвами и дефицитом основных макроэлементов внесение извести отдельно или в сочетании с K-удобрениями, а также с Mg- и Ca-содержащими удобрениями, улучшало жизнеспособность и рост клена (*Acer*) [110–112]. Доказано, что осина (*Populus tremula* L.) быстро реагирует на внесение удобрений. Годовой прирост объема осиновых насаждений, удобренных N-, P- и K-удобрениями, увеличился на 0.4–7.3 м<sup>3</sup>/га за 5 лет [41] и в среднем до 6.8 м<sup>3</sup>/га через 15 лет [105]. Повторное внесение N-удобрений в осиновые насаждения на Аляске увеличивало годовой прирост наземной биомассы от 0.6 до 1.77 т/га за 9 лет [82, 113].

Внесение удобрений на участках с дефицитом N способствует увеличению прироста деревьев, хотя растительность обычно усваивает только небольшую часть внесенного N [6, 114]. Удержание N в лесах линейно связано с внесенным количеством удобрения и составляет в среднем 25% (диапазон от 6 до 65%) и 35% (диапазон от 15 до 67%) в растительности и почве соответственно, а остальная часть теряется за счет вымывания и перехода в газообразную форму [6, 14, 115]. Внесение удобрений обычно не влияет на продуктивность участка постоянно, а устойчивое повышение прироста требует повторных внесений [116].

### ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ НА СВОЙСТВА ПОЧВ

Некоторые данные свидетельствуют о том, что внесение N-удобрений в хвойных лесах увеличивает накопление и секвестрацию углерода в гумусе. В работе [91] провели мета-анализ 48 исследований, в которых оценивали влияние удобрений или присутствия азотфиксирующих видов растений на запас углерода почвы. Большинство исследований показало увеличение содержания углерода в почве после внесения удобрений, но в некоторых случаях статистически значимой реакции не наблюдали. Результат, по-видимому, зависел от типа почвы, частоты внесения удобре-

ний и породы деревьев (качества лесной подстилки) [91]. В работе [117] обнаружили увеличение содержания углерода в минеральной почве на 14% через 11 лет после однократного внесения удобрений при посадке.

В работе [118] оценивали содержание углерода в почве и микробную активность на 2-х участках в Швеции. Первый обрабатывали N<sub>aa</sub> и N<sub>m</sub> в дозах 150 и 600 кг N/га и через 11 лет обнаружили увеличение запаса органического углерода в подстилке и почве на 16–25%. Второй участок обрабатывали дозой 150 кг N/га в виде N<sub>aa</sub> за 8 лет и за 1 год до измерений (всего N300), при этом обнаружили увеличение запаса органического углерода в подстилке и почве на 10%. Эффект был более выражен при внесении более высоких доз удобрений и при использовании N<sub>aa</sub> [118]. Отмечали также увеличение содержания углерода в почве с 13 до 17% после применения N<sub>aa</sub> и тройного суперфосфата на осиновых участках в центральной части Аляски [119].

Удобрения увеличивают поступление углерода в почву за счет возрастания количества опада и отпада. Соединения N реагируют с ароматическими органическими соединениями в почве, давая стойкие гуминовые соединения [120]. Есть также свидетельства, что N удобрения снижают скорость разложения гумуса [120, 121] за счет ингибирующего действия высоких концентраций N на продуцирование лигнолитических ферментов грибами белой гнили [13].

### НЕГАТИВНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ

Применение минеральных удобрений в лесных насаждениях наряду с высокой эффективностью может вызвать и негативные последствия в связи с загрязнением окружающей среды [122]. Удобрения в некоторых случаях могут способствовать загрязнению воды, почвы (при многократном внесении), а иногда и воздуха [53]. Наибольшую опасность представляет вымывание из почвы нитратов, аммиака и их попадание в реки, водоемы [53, 66, 123]. Однако основное количество удобрений попадает в водоемы с территорий сельскохозяйственных угодий. В лесу, при соблюдении форм, доз, сроков и технологии внесения элементы питания замыкаются в биологическом круговороте и практически не выносятся из экосистемы [93]. В этом отношении перспективным является применение медленнодействующих удобрений с полимерным покрытием [47, 53].

Внесение макроэлементов, как правило, снижает концентрацию микроэлементов в тканях,

что может вызвать нарушение роста растений. Например, в Финляндии, на участках с недостатком бора в хвое ели, внесение N-удобрений еще больше понизило его содержание, вызвало дисбаланс элементов питания и, как следствие, ухудшение роста [35].

При постоянном внесении N-удобрений фундаментальные изменения в круговороте углерода в почве из-за изменений микробной биомассы, экспрессии ферментов и состава соединений, содержащих углерод, в почве могут уменьшить или изменить круговорот других питательных веществ [112]. Препятствиями на пути внедрения практики использования удобрений могут быть стоимость удобрений, возражение против использования синтетических удобрений на государственных землях и мнение общественности по поводу потенциальной эвтрофикации дренажных вод, хотя N-удобрения в лесном хозяйстве обычно приводят к небольшому и временному увеличению концентрации N в водотоках [14, 79, 124].

IPCC предполагает потерю 1.25% удобрений в виде N<sub>2</sub>O или NO<sub>x</sub> в сельскохозяйственных почвах. Показано [125], что выбросы N<sub>2</sub>O увеличились после удобрения букового леса в Германии. Однако выбросы N<sub>2</sub>O снижались, если на участке также проводили известкование. Вероятно, это было связано с тем, что редуктаза закисной формы N, фермент, участвующий в последней стадии денитрификации, восстановлении N<sub>2</sub>O до N<sub>2</sub>, ингибируется при низкой величине pH [13].

Основное беспокойство вызывает влияние удобрений на качество воды и водные экосистемы. Однако многие научные исследования показали, что правильное внесение N- и P-удобрений не влияет на качество воды и не оказывает значительного неблагоприятного воздействия на видовой состав и продуктивность водных экосистем [14, 82, 102, 126].

Другая проблема, связанная с внесением удобрений, заключается в том, что они могут изменить состав, структуру и разнообразие видов подлеска [127–129]. Обилие вересковых, мохообразных и лишайников обычно снижается после внесения N-удобрений, в то время как доля трав увеличивается [33, 35, 129]. Изменение видового состава подлеска может повлиять на качество среды обитания диких животных как за счет изменений вертикальной структуры подлеска, так и за счет изменения кормовой базы для лесных видов животных. Внесение удобрений может повысить питательные и вкусовые качества древесных и травянистых видов подлеска и увеличить количество посещений дикими животными, употребляю-

щими их в пищу [129]. Однако там, где чрезмерный выпас препятствует регенерации древесных видов, внесение удобрений можно использовать для увеличения скорости роста, что снижает период уязвимости высаживаемых древесных культур для травоядных [82, 130].

Многократное внесение удобрений (периодически каждые 6 лет или ежегодно) оказывало негативное влияние на продолжительность жизни хвои и реакцию роста молодых насаждений сосны (*Pinus contorta* Dougl. var. *latifolia* Engelm.) во внутренних районах Британской Колумбии (Канада) [131].

Минеральные удобрения отрицательно влияли на физико-механические свойства древесины при их ежегодном и периодическом (через 5 лет) внесении в молодые плантационные насаждения и лесные культуры и ежегодном применении в средневозрастных насаждениях [132, 133].

Сбалансированность элементов питания способствует устойчивости древостоев к неблагоприятным погодным условиям и, в частности, к заморозкам. Внесение большого количества N-удобрений может нарушить баланс и сделать древостой менее устойчивыми. Например, внесение доз N-удобрений более чем 150 кг/га приводило к повреждению заморозками недостаточно одревесневших верхушечных побегов. Видимо, это было связано с недостатком бора, содержание которого в хвое удобренных растений уменьшалось до дефицитного уровня [134].

Внесение N-удобрений приводит к увеличению размеров крон, что в свою очередь повышает риск ветровалов в первые годы, снижаясь через 8 лет до первоначального уровня. Наибольшей опасности подвергались насаждения, в которых внесение удобрений и прореживание проходили одновременно. Прореживание в этом случае способствовало большему развитию кроны удобренных деревьев [35].

Потенциальные преимущества удобрений для ускорения роста деревьев и увеличения запасов углерода в почве необходимо сопоставлять с соответствующими издержками, поскольку производство, транспортировка и применение удобрений влекут за собой сжигание ископаемого топлива и выбросы CO<sub>2</sub> [79].

#### ОТРАЖЕНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ УДОБРЕНИЙ В НАЦИОНАЛЬНОЙ ОТЧЕТНОСТИ РКИК ООН

В настоящее время удобрения в лесном хозяйстве РФ практически не применяют, поэтому выбросы и поглощение парниковых газов, связан-

**Таблица 1.** Ориентировочный расчет результатов проекта внесения удобрений с точки зрения учета эмиссий парниковых газов

Компоненты углеродного бюджета	т CO <sub>2</sub> -экв/га (доверительный интервал)
Увеличение фитомассы (накопленное в течение 17 лет)	+14.4 (10.4–18.4)
Увеличение запасов крупных древесных остатков (отношение массы мертвой древесины к фитомассе 0.12) [136]	+1.7 (1.3–2.2)
Увеличение запасов углерода в почве (накопленное в течение 20–30 лет, предполагая начальное содержание 40 т С/га)	+5.5 (0.8–10.2)
Выбросы CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O от сжигания топлива при внесении удобрений: от 30 кг CO <sub>2</sub> /га при использовании тракторов [5], 300 кг CO <sub>2</sub> /ч при использовании вертолета и до 1000 кг CO <sub>2</sub> /ч при использовании самолета [137]	–0.1 (0.03–0.5)
Прямые выбросы N <sub>2</sub> O [5]	–0.70 (–1.26–0.07)
Непрямые выбросы N <sub>2</sub> O [5]	–0.08 (–0.27–0.00)
Баланс:	20.7 (14.2–27.0)

Примечание. По данным табл. 1, для секвестрирования дополнительной тонны CO<sub>2</sub> средневозрастными хвойными лесами южной тайги требуется внесений 7.2 кг азота (доверительный интервал – 5.6–10.3). Потенциальное увеличение чистого поглощения составляет в среднем 1.08 (0.82–1.51) т CO<sub>2</sub>-экв/га/год.

ные с их использованием, не представлены в национальном кадастре парниковых газов [135]. Необходимо отметить, что методы оценки выбросов парниковых газов при применении органических, минеральных и известковых удобрений в настоящее время разработаны и рекомендованы к использованию в руководящих указаниях МГЭИК [5, 36].

При использовании удобрений в лесных климатических проектах необходимо учитывать выбросы N<sub>2</sub>O и CO<sub>2</sub>, происходящие в результате добавления известковых материалов и удобрений, содержащих N<sub>м</sub>. Для большинства почв увеличение доступного N повышает темпы нитрификации и денитрификации, что приводит затем к увеличению производства N<sub>2</sub>O [5]. В среднем выбросы N<sub>2</sub>O составляют ≈1% от N, внесенного в почвы [36], хотя этот коэффициент выбросов может варьировать в зависимости от параметров

окружающей среды (климата, содержания органического углерода, гранулометрического состава, кислотности) и других факторов (например, скорости поступления N в почву, вида удобрений) [5].

Помимо прямых выбросов N<sub>2</sub>O из почв, необходимо учитывать косвенные выбросы N<sub>2</sub>O, которые связаны с улетучиванием N в виде NH<sub>3</sub> и окислов N (NO<sub>x</sub>) и поступлением этих газов и их производных (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> и NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) в почву и на поверхность водоемов, а также в результате вымывания из почвы и поверхностного стока N, входящего в состав удобрений [5, 36]. Обновленный набор коэффициентов прямых и косвенных выбросов N<sub>2</sub>O, а также выбросов CO<sub>2</sub> от внесения удобрений и известкования почв представлен в руководстве МГЭИК [5].

Результаты проекта применения удобрений должны сравниваться с базовой линией (без проекта), и разница может быть засчитана в единицах сокращения выбросов. Выбросы парниковых газов при этом включают: сжигание ископаемого топлива техникой при внесении удобрений (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O), прямые и непрямые выбросы N<sub>2</sub>O при применении N-удобрений, выбросы CO<sub>2</sub> при применении известкования и N<sub>м</sub>. Поглощение включает в себя резервуар живой фитомассы, крупных древесных остатков, органического вещества почвы, долгосрочное хранение углерода в лесоматериалах.

Результаты проекта применения удобрений с точки зрения учета эмиссий парниковых газов необходимо сравнивать с базовой линией (без проекта), и разница может быть засчитана в единицах сокращения выбросов. Выбросы парниковых газов при этом включают: сжигание ископаемого топлива техникой при внесении удобрений (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O), прямые и непрямые выбросы N<sub>2</sub>O при применении N-удобрений, выбросы CO<sub>2</sub> при известковании и внесении N<sub>м</sub>. Сокращение выбросов может включать следующие компоненты: увеличение запасов фитомассы, крупных древесных остатков, углерода в почве, долгосрочное хранение углерода в лесоматериалах. Ориентировочный расчет результатов проекта внесения удобрений приведен в табл. 1. Данный расчет основан на собранной нами базе данных экспериментов по внесению удобрений [42]. Предполагается научно обоснованный отбор насаждений и соблюдение технологии внесения (удобрение – N<sub>аа</sub>150, хвойные древостои южной тайги 40–70-летнего возраста).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внесение удобрений в тщательно отобранных насаждениях является одним из эффективных методов увеличения их производительности и усиления углеродпоглощающей способности лесов. Основанием для внесения удобрений могут быть тип леса и бонитет древостоев, но более точно определить необходимость и рассчитать дозу внесения удобрений можно по результатам химического анализа хвои, листвы и почв. Применение удобрений без учета конкретных условий может привести к загрязнению окружающей среды, повышенным эмиссиям и нарушению биоразнообразия.

Внесение удобрений наиболее эффективно в сочетании с другими лесоводственными мероприятиями, в частности, с рубками ухода. Удобрение перегущенных древостоев приводит к повышенному отпаду, удобрение слишком редких — к не пропорциональному увеличению фитомассы ветвей. Применение удобрений является важным компонентом плантационного лесовыращивания, где сочетание селекционного посадочного материала, полива, рубок ухода позволяет создать оптимальные условия для роста растений и поглощения углерода.

Наибольший эффект от внесения удобрений наблюдают в средних по продуктивности условиях местопроизрастания с достаточным, но не избыточным увлажнением, на 1–2 класса бонитета ниже от регионального максимума в возрасте максимального текущего прироста общей или деловой древесины (40–70 лет для хвойных пород).

Наиболее популярными (недорогими, но эффективными) являются N-удобрения. Многолетние эксперименты в Финляндии, Швеции, Канаде и России показали, что поглощение 1 т CO<sub>2</sub> фитомассой хвойных насаждений требует от 7 до 31 кг (в среднем 14) действующего вещества удобрений, в основном азота. Однако необходимо контролировать наличие прочих элементов питания, в частности P, K и бора, недостаток которых может ограничить эффект от применения N-удобрений.

Применение минеральных удобрений может также обеспечить более высокие темпы аккумуляции органического углерода в почве (от 5 до 30%) в зависимости от типа леса, типа почвы, а также от вида и объема примененных удобрений. Это обеспечивает долговременное накопление углерода в соизмеримых с наземной фитомассой объемах. Более точные оценки накопления углерода в почве могут быть получены в результате моделирования для конкретных условий.

Совместное внесение N-удобрений и ингибиторов уреазы позволяет снизить потери N и уменьшить дозы удобрения. Медленно растворяющиеся комбинированные удобрения способны обеспечить долговременный эффект от их применения, избежать стресс при внесении, уменьшить потери удобрений (эмиссию парниковых газов, загрязнение окружающей среды). Однако их применение ограничено более высокой стоимостью.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pörtner H.-O., Roberts D.C., Tignor M.M.B., Poloczanska E.S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., Rama B. Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Climate Change, 2022.
2. Global forest resources assessment 2020. Rome: FAO, 2020.
3. Lesiv M., Schepaschenko D., Moltchanova E., Bun R., Dürauer M., Prishchepov A.V., Schierhorn F., Estel S., Kuemmerle T., Alcántara C., Kussul N., Shchepashchenko M., Kutovaya O., Martynenko O., Karminov V., Shvidenko A., Havlik P., Kraxner F., See L., Fritz S. Spatial distribution of arable and abandoned land across former Soviet Union countries // Sci. Data. 2018. V. 5. 180056.
4. Dolman A.J., Shvidenko A., Schepaschenko D., Ciaia P., Tchebakova N., Chen T., Van Der Molen M.K., Beletti Marchesini L., Maximov T.C., Maksyutov S., Schulze E.-D. An estimate of the terrestrial carbon budget of Russia using inventory-based, eddy covariance and inversion methods // Biogeosciences. 2012. V. 9. № 12. P. 5323–5340.
5. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories / Eds. Calvo Buendia E., Tanabe K., Kranjc A., Baasansuren J., Fukuda M., Ngarize S., Osako A., Pyrozhenko Y., Shermanau P., Federici S. Switzerland: IPCC, 2019.
6. Johnson D.W. Nitrogen retention in forest soils // J. Environ. Qual. 1992. V. 21. № 1. P. 1–12.
7. Vitousek P.M., Howarth R.W. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? // Biogeochemistry. 1991. V. 13. P. 87–115.
8. Albrektson A., Aronsson A., Tamm C.O. Effect of forest fertilisation on primary production and nutrient cycling in the forest ecosystem // Silva Fennica. 1977. V. 11. № 3. P. 233–239.
9. Reich P.B., Grigal D.F., Aber J.D., Gower S.T. Nitrogen mineralization and productivity in 50 hardwood and conifer stands on diverse soils // Ecology. 1997. V. 78. № 2. P. 335–347.
10. Krause H.H., Weetman G.F., Koller E., Veilleux J.-M. Interprovincial forest fertilization program 1968–1983. V. 21. Faculty of Forestry, University of British Columbia, 1987. 55 p.
11. Albaugh T.J., Allen H.L., Dougherty P.M., Kress L.W., King J.S. Leaf area and above- and belowground growth

- responses of loblolly pine to nutrient and water additions // *Forest Sci.* 1998. V. 44. № 2. P. 317–328.
12. *Canary J.D., Harrison R.B., Compton J.E., Chappell H.N.* Additional carbon sequestration following repeated urea fertilization of second-growth Douglas-fir stands in western Washington // *Forest Ecol. Manag.* 2000. V. 138. № 1. P. 225–232.
  13. *Grayston S.* Effects of forest fertilization on soil C sequestration and greenhouse gas emissions. Greenhouse-gas budget of soils under changing climate and landuse (Burnout) // *Proceed. Europ. Sci. Found. COST Action 639 Workshop*, 2007. V. 110. P. 33–38.
  14. *Binkley D., Fisher R.F.* Nutrition Management // *Ecology and Management of Forest Soils*. John Wiley & Sons, Ltd, 2019. P. 319–349.
  15. *Brockley R.P.* Response of thinned, immature lodgepole pine to nitrogen and boron fertilization // *Canad. J. Forest Res.* 1990. V. 20. № 5. P. 579–585.
  16. *Fox T.R.* Sustained productivity in intensively managed forest plantations // *Forest Ecol. Manag.* 2000. V. 138. № 1. P. 187–202.
  17. *From F., Strengbom J., Nordin A.* Residual long-term effects of forest fertilization on tree growth and nitrogen turnover in boreal forest // *Forests*. 2015. V. 6. № 4. P. 1145–1156.
  18. *Федорец Н.Г., Соколов А.И., Солодовников А.Н.* Последствие минеральных удобрений в посевах сосны в долгосрочном эксперименте в Карелии // *Лесоведение*. 2018. № 5. С. 372–380.
  19. *Derome J.* Effects of forest liming on the nutrient status of podzolic soils in Finland // *Water Air Soil Pollut.* 1990. V. 54. № 1. P. 337–350.
  20. *Цареградская С.Ю., Аршинова Т.И.* Влияние минеральных удобрений на продуктивность рекреационных сосняков Подмосквья // *Повышение комплексной продуктивности лесов: сб. научн. тр. М.: ВНИИЛМ*, 1987. С. 115–123.
  21. *Паавилайнен Э.* Применение минеральных удобрений в лесу. Пер. с финского Л.В. Блюдника / Под ред. В.С. Победова. М.: Лесн. пром-ть, 1983. 96 с.
  22. *Сляднев А.П.* Применение минеральных удобрений в сосняках зоны смешанных лесов // *Лесн. хоз-во*. 1971. № 10. С. 34–35.
  23. *Степаненко А.А.* Интенсификация целевого выращивания сосновых насаждений в южно-таежном лесном районе таежной зоны европейской части России: Дис. ... д-ра с.-х. наук. М.: ЦЭПЛИ, 2010. 356 с.
  24. *Janssens I.A., Dieleman W., Luyssaert S., Subke J.-A., Reichstein M., Ceulemans R., Ciais P., Dolman A.J., Grace J., Matteucci G., Papale D., Piao S.L., Schulze E.-D., Tang J., Law B.E.* Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition // *Nat. Geosci.* 2010. V. 3. № 5. P. 315–322.
  25. *Bracho R., Vogel J.G., Will R.E., Noormets A., Samuelson L.J., Jokela E.J., Gonzalez-Benecke C.A., Gezan S.A., Markewitz D., Seiler J.R., Strahm B.D., Teskey R.O., Fox T.R., Kane M.B., Laviner M.A., McEligot K.M., Yang J., Lin W., Meek C.R., Cucinella J., Akers M.K., Martin T.A.* Carbon accumulation in loblolly pine plantations is increased by fertilization across a soil moisture availability gradient // *Forest Ecol. Manag.* 2018. V. 424. P. 39–52.
  26. *Binkley D., Sollins P.* Factors determining differences in soil pH in adjacent conifer and alder-conifer stands // *J. Soil Sci.* 1990. V. 54. № 5. P. 1427–1433.
  27. *Brozek S.* Effect of soil changes caused by red alder (*Alnus rubra*) on biomass and nutrient status of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) seedlings // *Canad. J. For. Res.* 1990. V. 20. № 9. P. 1257–1264.
  28. *Paschke M.W., Dawson J.O., David M.B.* Soil nitrogen mineralization in plantations of *Juglans nigra* interplanted with actinorhizal *Elaeagnus umbellata* or *Alnus glutinosa* // *Plant and Soil*. 1989. V. 118. № 1. P. 33–42.
  29. *Nichols J.D., Bristow M., Vanclay J.K.* Mixed-species plantations: Prospects and challenges: Improving productivity in mixed-species plantations // *Forest Ecol. Manag.* 2006. V. 233. № 2. P. 383–390.
  30. *Тумов В.А.* Опыт выращивания ольхи черной и ее почвоулучшающая роль в смешанных с ясенем обыкновенным культурах: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Л.: ЛТА им. С.М. Кирова, 1980. 19 с.
  31. *Nilsen P.* Fertilization experiments on forest mineral soils: A Review of the Norwegian results // *Scand. J. For. Res.* 2001. V. 16. № 6. P. 541–554.
  32. Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2018 and inventory report 2020. Submission to the UNFCCC Secretariat: European Environment Agency. Annual–Brussels, 2020. 997 p.
  33. *Keipi K.* The concept of forest fertilization returns in Norway, Sweden and Finland // *Folia Forest.* 1972. V. 152. P. 38.
  34. *Nohrstedt H.-Ö.* Response of coniferous forest ecosystems on mineral soils to nutrient additions: A Review of Swedish experiences // *Scand. J. For. Res.* 2001. V. 16. № 6. P. 555–573.
  35. *Saarsalmi A., Mälkönen E.* Forest fertilization research in Finland: A Literature review // *Scand. J. For. Res.* 2001. V. 16. № 6. P. 514–535.
  36. IPCC 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories. Guidelines for national greenhouse gas inventories. Hayama, Japan: IGES, 2006.
  37. *Jaakkola T., Mäkinen H., Saranpää P.* Wood density of Norway spruce: Responses to timing and intensity of first commercial thinning and fertilisation // *Forest Ecol. Manag.* 2006. V. 237. P. 513–521.
  38. Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks: 1990–2019: Reports and assessments/United States Environmental Protection Agency. US EPA O., 2021. 785 p.
  39. *Weetman G.F., Krause H.H., Koller E.* Interprovincial forest fertilization program-results of five-year growth remeasurements in thirty installations: fertilized in 1969, remeasured in 1974. *Canad. Forest Serv. Ottawa, Ont.*, 1976. 27 p.
  40. *Weetman G.F., Krause H.H.* Interprovincial forest fertilization program. Results of five-year growth remeasurements in 17 installations fertilized in 1972 and remeasured in 1976: *Canad. Forest Serv. Ottawa*, 1979. 27 p.
  41. *Weetman G.F., Krause H.H., Koller E., Veilleux J.-M.* Interprovincial forest fertilization trials 5- and 10-year results // *Forest. Chronicle*. 1987. V. 63. № 3. P. 184–192.
  42. *Щепащенко Д.Г., Мухортова Л.В., Мартыненко О.В.* База данных по применению минеральных удоб-

- рений в лесном хозяйстве и их влиянию на углеродный бюджет лесов. Zenodo, 2023. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7693698>
43. *Mälkönen E., Kukkola M.* Effect of long-term fertilization on the biomass production and nutrient status of Scots pine stands // *Fertil. Res.* 1991. V. 27. № 1. P. 113–127.
  44. *Победов В.С.* Применение удобрений в лесном хозяйстве. М.: Лесн. пром-ть, 1972. 201 с.
  45. *Победов В.С.* Исследование и обоснование применения минеральных удобрений в интенсивном лесном хозяйстве (на примере Белорусской ССР): Дис. д-ра с.-х. наук. Гомель, 1981. 450 р.
  46. *Шумаков В.С.* Достижения и проблемы применения минеральных удобрений в лесном хозяйстве СССР // *Агрохимия.* 1972. № 7. P. 145–153.
  47. *Копытков В.В.* Руководство по исследованию и применению композиционных материалов при лесовыращивании. М.: Лесн. пром-ть, 1991. 233 р.
  48. Наставление по системам применения удобрений в лесном хозяйстве на европейской территории СССР. М.: Гос. комитет СССР по лесу, 1991.
  49. *Мойко М.Ф.* Внесение минеральных удобрений – эффективное средство повышения продуктивности лесных насаждений // *Применение минеральных удобрений в лесном хозяйстве.* 1977. P. 23–28.
  50. ОСТ 56-93-87 Питомники лесные постоянные. Технология выращивания посадочного материала в различных лесорастительных зонах СССР. 1987. 27 с.
  51. Рекомендации по диагностике минерального питания сосны на лесосеменных плантациях. М.: ВНИИЛМ Гослесхоза СССР, 1986. 19 с.
  52. Рекомендации по уточнению сроков применения азотных удобрений в хвойных лесах южной тайги и зоны хвойно-широколиственных лесов центральных районов РСФСР. М.: ВНИИЛМ, 1985. 18 р.
  53. *Победов С.В., Булавик И.М., Лебедев Е.А.* Справочник по удобрениям в лесном хозяйстве. 2-е изд. М.: Агропромиздат, 1986. 172 с.
  54. *Богданов П.Л.* Изменение почвенной среды под воздействием извести на замшелых вырубках и сфагновых болотах // *Лесн. журн.* 1964. № 3. С. 31–26.
  55. *Еникеева М.Г., Иваницкая Е.Ф.* Влияние известкования на микрофлору и некоторые свойства лесной почвы // *Лесоведение,* 1971. № 2. P. 58–70.
  56. *Кошельков С.П.* Применение удобрений для улучшения роста сосны // *Лесоведение.* 1969. № 4. P. 64–72.
  57. *Щербаков А.П.* Опыт применения листовой диагностики для определения потребности сосны в азоте и фосфоре // *Физиологическое обоснование системы питания растений.* М.: Наука, 1964. P. 324–331.
  58. *Tamm C.O.* Some experiences from forest fertilization trials in Sweden // *Silva Fennica.* 1965. V. 117. № 3. P. 1–24.
  59. *Viro P.J.* Estimation of the effect of forest fertilization // *Metsantutkimuslaitoksen julk.* 1965. V. 59. № 3. P. 5–42.
  60. *Булавик И.М.* Действие азотных удобрений на режим питания и прирост древесины в сосняках БССР: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Минск, 1977. 24 с.
  61. *Albaugh T.J., Fox T.R., Cook R.L., Raymond J.E., Rubilar R.A., Campoe O.C.* Forest fertilizer applications in the southeastern united states from 1969 to 2016 // *Forest Sci.* 2019. V. 65. № 3. P. 355–362.
  62. *Бузыкин А.И.* Реакция соснового древостоя на внесение удобрений в условиях Приангарья // *Тез. докл. 1-й Всесоюзн. конф. по физиологии и биохимии древесн. раст.* Красноярск, 1974. С. 46.
  63. *Матюшкин В.А., Скороходова О.Н.* Изменение видового состава и обилия живого напочвенного покрова в сосняках травяно-сфагновых под влиянием проведения комплекса лесохозяйственных мероприятий // *Антропогенная трансформация таежных экосистем Европы: экологические, ресурсные и хозяйственные аспекты.* Петрозаводск: ИЛ КарНЦРАН, 2004. С. 230–233.
  64. *Morrison I.K., Foster N.W.* Effect of nitrogen, phosphorus and magnesium fertilizers on growth of a semimature jack pine forest, northwestern Ontario // *Forest Chronicle.* 1995. V. 71. № 4.
  65. *Гелес И.С., Шубин В.И., Коржицкая З.А.* Влияние удобрений на некоторые свойства древесины сосны // *Лесоведение.* 1987. № 4. С. 72–77.
  66. *Воронкова А.Б.* Потери азота в форме аммиака из удобрений при подкормке еловых древостоев // *Агрохимия.* 1981. № 2. С. 3–9.
  67. *Zobel B.* Wood quality from fast-grown plantations // *Tappi.* 1981. V. 64. № 1. P. 71–74.
  68. *Hagner M.* Strategier for ett norrlandskt industris kogsbruk // *Skogs – Lantbruk Sakad. Tidskr.* 1989. V. 128. № 415. P. 345–349.
  69. *Коржицкий В.Д.* Влияние азотных удобрений (мочевины) на рост и развитие сосновых насаждений в условиях южной Карелии: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Петрозаводск, 1977. 24 с.
  70. *Puro T.* Effect of fertilization time on growth reaction of different tree species // *Folia Forestalia.* 1982. V. 507. P. 1–14.
  71. *Капост В.Я., Сацениекс В.Я.* Применение минеральных удобрений в насаждениях хвойных пород Латвийской ССР // *Применение минеральных удобрений в лесном хозяйстве.* Тарту, 1977. С. 8–12.
  72. *Schmidt W.C.* Zur techik der dungerausbringung im wald // *Allgemeine Forstzeitschrift.* 1983. V. 38. № 41. P. 1103–1104.
  73. *Sefatsson J.* Arbetsmetoder vid skogs-godsling. 1966. V. 1. № 22. P. 27–32.
  74. *Воронкова А.Б.* Роль азотных удобрений в оптимизации почвенного звена азотного питания хвойных пород // *Повышение плодородия лесных почв.* М.: ВНИИЛМ, 1989. С. 63–73.
  75. *Posey C.E.* The effects of fertilization upon wood properties of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) // *Tree Improv. Genet. – Southern Forest Tree Improv. Conf. School of Forestry, North Carolina Agricult. Exp. Station.* 1964. P. 126–130.

76. Fox T.R., Lee Allen H., Albaugh T.J., Rubilar R., Carlson C.A. Tree nutrition and forest fertilization of pine plantations in the southern United States // Southern J. Appl. Forest. 2007. V. 31. № 1. P. 5–11.
77. Zhao D., Kane M., Teskey R., Fox T.R., Albaugh T.J., Allen H.L., Rubilar R. Maximum response of loblolly pine plantations to silvicultural management in the southern United States // Forest Ecol. Manag. 2016. V. 375. P. 105–111.
78. Gao W., Yang H., Kou L., Li S. Effects of nitrogen deposition and fertilization on N transformations in forest soils: a review // J. Soils Sediment. 2015. V. 15. № 4. P. 863–879.
79. Mayer M., Prescott C.E., Abaker W.E.A., Augusto L., Cécillon L., Ferreira G.W.D., James J., Jandl R., Katzensteiner K., Laclau J.-P., Laganière J., Nouvellon Y., Paré D., Stanturf J.A., Vanguelova E.I., Vesterdal L. Tamm review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis // Forest. Ecol. Manag. 2020. V. 466. Tamm Review 118127.
80. Miller H.G. Forest fertilization: Some guiding concepts // Forestry: Inter. J. Forest Res. 1981. V. 54. Forest Fertil. № 2. P. 157–167.
81. Johnson D.W. Effects of forest management on soil carbon storage // Water Air Soil Pollut. 1992. V. 64. № 1. P. 83–120.
82. Colombo S.J., Parker W.C., Luckai N., QingLai D., Tie-Bo C. The effects of forest management on carbon storage in Ontario's forests // Climate Change Res. Rep. – Ontario Forest Research Institute. 2005. № CCRR-03.
83. Грязькин А.В., Мельников Е.С. Естественное возобновление ели на участках, пройденных комплексным уходом // Лесн. журн. 1995. № 2–3. С. 195–197.
84. Мельников Е.С. Лесоводственные основы теории и практики комплексного ухода за лесом: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. СПб., 1999. 45 с.
85. Шубин В.И., Гелес И.С., Крутов В.И. Повышение производительности культур сосны и ели на вырубках. Петрозаводск: КарелНЦ АН СССР, 1991. 176 с.
86. Granheim P.O., Braekke F.H. Vegetation changes on a soligenous mire complex after fertilization and liming // Res. Paper Skogforsk, 1993. P. 15.
87. Haywood J.D., Thill R.E. Long-term responses of understory vegetation on a highly erosive Louisiana soil to fertilization. V. 382. Asheville (NC): The Station, 1995. 6 p.
88. Stewart H.S.D. Reviewing the scientific use of fertilizers in forestry // J. Forest. 1965. V. 63. № 7. P. 501–508.
89. Heinsdorf D. Beitrag über die Beziehungen zwischen dem Gehalt an Makronährstoffen N, P, K, Mg in Boden und Nadeln und der Wuchsleistung von Kiefern-kulturen in Mittelbrandenburg // Arch. Agron. Soil Sci. 1963. V. 7. № 4. P. 331–353.
90. Ладейщикова Е.И., Побегайло А.И., Белый Г.Д., Черных А.Г. К вопросу о применении удобрений в сосняках, предрасположенных к поражению корневой губкой // Лесоведение. 1980. № С. 3–9.
91. Johnson D.W., Curtis P.S. Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis // Forest Ecol. Manag. 2001. V. 140. № 2. P. 227–238.
92. Polge H. Contribution de la densitométrie à la science du bois // Xylorama: Trends in Wood Research / Tendenzen in der Holzforschung / Ed. L.J. Kučera. Basel: Birkhäuser, 1985. P. 146–154.
93. Шутков И.В., Маслаков Е.Л., Маркова И.А., Полянский Е.В., Бельков В.П., Гладков Е.Г., Голованский И.Н., Рябинин Б.Н., Морозов В.А., Шиманский П.С. Лесные плантации (ускоренное выращивание ели и сосны). М.: Лесн. пром-ть, 1984. 248 с.
94. Шумаков В.С. О применении минеральных удобрений в лесном хозяйстве // Лесн. хоз-во. 1981. № 5. С. 17–20.
95. Scarratt J.B. Forestry practices in Scandinavia. P. 1. Sweden // Forest Newsletter. 1988. Summer. P. 3–7.
96. Laakkonen O. Toistuvan lannoituksen kannattavuus etelasuomen Kuivahkon kankaan mannikoissa // Folia Forest. 1989. № 741. P. 1–26.
97. Fight R.D., Briggs D.G., Fahey T.D. Silvicultural regimes to enhance wood quality and economic return in coast Douglas-fir // 19<sup>th</sup> World Congr. “Sci Forest IUFRO's 2<sup>nd</sup> Century”, Montreal, 5–11 Aug., 1990. Div.5/Int. Union Forest Res. Organ. Montreal, 1990. P. 425.
98. Победов В.С. Экономическая эффективность использования минеральных удобрений в лесном хозяйстве. М.: ЦБНТИ лесхоз, 1975. 43 с.
99. Вярбила В.В. Влияние минеральных удобрений на рост и продуктивность сосновых насаждений в связи с колебанием климата и разреживанием: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Минск, 1983. 20 с.
100. Клинов М.А., Грудинин И.В. Лесоводственная эффективность применения азотных удобрений в сосновых насаждениях // Удобрения и гербициды в лесных питомниках и культурах. Петрозаводск: КФ АН СССР, 1987. С. 100–107.
101. Newton P.F., Amponsah I.G. Systematic review of short-term growth responses of semi-mature black spruce and jack pine stands to nitrogen-based fertilization treatments // Forest Ecol. Manag. 2006. V. 237. № 1. P. 1–14.
102. Allen H.L. Forest fertilizers // J. Forestry. 1987. V. 85. № 2. P. 37–46.
103. Kawana A., Xydias G.K., Leaf A.L. Response of *Pinus resinosa* ait. Plantations to potassium fertilization on a potassium-deficient site // Plant and Soil. 1969. V. 30. № 3. P. 439–445.
104. Mitchell A.K., Barclay H.J., Brix H., Poltlard D.F.W., Benton R., deJong R. Biomass and nutrient element dynamics in Douglas-fir: effects of thinning and nitrogen fertilization over 18 years // Canad. J. Forest Res. 1996. V. 6. № 3. P. 376–388.
105. Yang R.C. Foliage and stand growth responses of semi-mature lodgepole pine to thinning and fertilization // Canad. J. Forest Res. 1998. V. 28. № 12. P. 1794–1804.
106. Stegemoeller K.A., Chappell H.N. Effects of fertilization and thinning on 8-year growth responses of second-growth Douglas-fir stands // Canad. J. Forest Res. 2011. V. 21. № 4. P. 516–521.
107. Valinger E. Effects of thinning and nitrogen fertilization on growth of Scots pine trees: total annual biomass increment, needle efficiency, and aboveground allocation of biomass increment // Canad. J. For. Res. 2011. V. 7. № 1. P. 219–228.

108. Safford L.O., Czapowskyj M.M. Fertilizer stimulates growth and mortality in a young *Populus-Betula* stand: 10-year results // *Canad. J. Forest Res.* 1986. V. 16. № 4. P. 807–813.
109. Wilmot T.R., Ellsworth D.S., Tyree M.T. Base cation fertilization and liming effects on nutrition and growth of Vermont sugar maple stands // *Forest Ecol. Manag.* 1996. V. 84. № 1. P. 123–134.
110. Fyles J.W., Côté B., Courchesne F., Hendershot W.H., Savoie S. Effects of base cation fertilization on soil and foliage nutrient concentrations, and litter-fall and throughfall nutrient fluxes in a sugar maple forest // *Canad. J. Forest Res.* 1994. V. 24. № 3. P. 542–549.
111. Long R.P., Horsley S.B., Lilja P.R. Impact of forest liming on growth and crown vigor of sugar maple and associated hardwoods // *Canad. J. Forest Res.* 1997. V. 27. № 10. P. 1560–1573.
112. Wang J.-J., Bowden R.D., Lajtha K., Washko S.E., Wurzbacher S.J., Simpson M.J. Long-term nitrogen addition suppresses microbial degradation, enhances soil carbon storage, and alters the molecular composition of soil organic matter // *Biogeochemistry.* 2019. V. 142. № 2. P. 299–313.
113. Cleve K.V., Oliver L.K. Growth response of postfire quaking aspen (*Populus tremuloides* Michx.) to N, P, and K fertilization // *Canad. J. Forest Res.* 1982. V. 12. № 2. P. 160–165.
114. Foster N.W., Morrison I.K. Soil fertility, fertilization and growth of Canadian forests. Great Lakes Forest Research Centre, 1983. O-X-353. 21 p.
115. Chappell H.N., Cole D.W., Gessel S.P., Walker R.B. Forest fertilization research and practice in the Pacific Northwest // *Fertil. Res.* 1991. V. 27. № 1. P. 129–140.
116. Cole D.W. Soil nutrient supply in natural and managed forests // *Plant and Soil.* 1995. V. 168. № 1. P. 43–53.
117. Leggett Z.H., Kelting D.L. Fertilization effects on carbon pools in loblolly pine plantations on two upland sites // *J. Soil Sci.* 2006. V. 70. № 1. P. 279–286.
118. Nohrstedt H.-Ö. Effects of repeated nitrogen fertilization with different doses on soil properties in a *Pinus sylvestris* stand // *Scand. J. Forest Res.* 1990. V. 5. № 1–4. P. 3–15.
119. Cleve K.V., Moore T.A. Cumulative effects of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizer additions on soil respiration, pH, and organic matter content // *J. Soil Sci.* 1978. V. 42. № 1. P. 121–124.
120. Berg B., Staaf H., Wessen B. Decomposition and nutrient release in needle litter from nitrogen-fertilized scots pine (*Pinus sylvestris*) stands // *Scand. J. Forest Res.* 1987. V. 2. № 1–4. P. 399–415.
121. Magill A.H., Aber J.D. Long-term effects of experimental nitrogen additions on foliar litter decay and humus formation in forest ecosystems // *Plant and Soil.* 1998. V. 203. № 2. P. 301–311.
122. Хайниш Э.Е., Паукке Х., Нагель Х.Д. Агрехимикаты в окружающей среде. Пер.с нем. Н.Г. Ракипова. М.: Колос, 1979. 357 с.
123. Победов В.С. Потери азота с инфильтрационными водами из обычных и медленней действующих форм азотных удобрений в сосновых культурах // *Агрехимия.* 1988. № 4. С. 11–15.
124. Smethurst P.J. Forest fertilization: Trends in knowledge and practice compared to agriculture // *Plant and Soil.* 2010. V. 335. P. 83–100.
125. Brumme R., Beese F. Effects of liming and nitrogen fertilization on emissions of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O from a temperate forest // *J. Geophys. Res.: Atmospheres.* 1992. V. 97. № D12. P. 12851–12858.
126. Binkley D., Burnham H., Lee Allen H. Water quality impacts of forest fertilization with nitrogen and phosphorus // *Forest Ecol. Manag.* 1999. V. 121. № 3. P. 191–213.
127. Fahey T.J., Battles J.J., Wilson G.F. Responses of early successional northern hardwood forests to changes in nutrient availability // *Ecol. Monograph.* 1998. V. 68. № 2. P. 183–212.
128. Thomas S.C., Halpern C.B., Falk D.A., Liguori D.A., Austin K.A. Plant diversity in managed forests: Understorey responses to thinning and fertilization // *Ecol. Appl.* 1999. V. 9. P. 864–879.
129. Turkington R., John E., Watson S., Secombe-Hett P. The effects of fertilization and herbivory on the herbaceous vegetation of the boreal forest in north-western Canada: a 10-year study // *J. Ecol.* 2002. V. 90. № 2. P. 325–337.
130. Auchmoody L.R. Response of young black cherry stands to fertilization // *Canad. J. Forest Res.* 1982. V. 12. № 2. P. 319–325.
131. Amponsah I.G., Comeau P.G., Brockley R.P., Lieffers V.J. Effects of repeated fertilization on needle longevity, foliar nutrition, effective leaf area index, and growth characteristics of lodgepole pine in interior British Columbia, Canada // *Canad. J. Forest Res.* 2005. V. 35. № 2. P. 440–451.
132. Матюшкина А.П., Агеева М.И., Сарелайнен А.Н., Левкина Г.М. Влияние макроструктуры древесины сосны обыкновенной на свойства целлюлозы // Биологическая и хозяйственная продуктивность лесных фитоценозов Карелии. Петрозаводск: КФ АН СССР Ин-т леса, 1977. С. 130–136.
133. Вярбила В.В., Шлейнис Р.И. Влияние удобрения сосновых насаждений на качество древесины // *Лесн. хоз-во.* 1981. № 12. С. 8–11.
134. Mälkönen E., Derome J., Kukkola M. Effects of nitrogen inputs on forest ecosystems estimation based on long-term fertilization experiments // *Acidification in Finland.* Springer, 1990. P. 325–347.
135. Национальный доклад о кадастре антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом за 1990–2018 гг: ИГКЭ. Нац. докл. М., 2020.
136. Shvidenko A., Mukhortova L., Kapitsa E., Kraxner F., See L., Pyzhev A., Gordeev R., Fedorov S., Korotkov V., Bartalev S., Schepaschenko D. A Modelling system for dead wood assessment in the forests of Northern Eurasia // *Forests.* 2023. V. 14. № 1. 45.
137. Markewitz D. Fossil fuel carbon emissions from silviculture: Impacts on net carbon sequestration in forests // *Forest Ecol. Manag.*, 2006. V. 236. № 2. P. 153–161.

## **Application of Mineral Fertilizers in Forests with Respect to Forest Carbon Budget**

**D. G. Schepaschenko<sup>a,b,#</sup>, L. V. Mukhortova<sup>c</sup>, O. V. Martynenko<sup>d</sup>,  
V. N. Korotkov<sup>e</sup>, and V. N. Karminov<sup>f</sup>**

<sup>a</sup>*International Institute for Applied Systems Analysis  
Schlossplatz 1, Laxenburg A-2361, Austria*

<sup>b</sup>*Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS  
ul. Profsoyuznaya 84/32, Moscow 117997, Russia*

<sup>c</sup>*Institute of Forest, Siberian Branch RAS  
Akademgorodok 50 (28), Krasnoyarsk 660036 Russia*

<sup>d</sup>*All-Russian Institute of Continuous Education in Forestry  
ul. Institutskaya 17, Moscow region, Pushkino 141202 Russia*

<sup>e</sup>*Yu. A. Izrael Institute of Global Climate and Ecology  
ul. Glebovskaya 20B, Moscow 107258, Russia*

<sup>f</sup>*Mytishchi Branch of, Bauman Moscow State Technical University  
ul. 1st Institutskaya 1, Mytishchi, 141005 Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: schepd@iiasa.ac.at*

Carbon sequestration and conservation is one of the important ecosystem functions of the forest. The task of modern science is to explore the possibilities of enhancing this function in order to counter the increase in the concentration of carbon dioxide in the atmosphere. Sustainable and climate smart forestry, in particular the use of mineral fertilizers, are an effective way to increase the productivity of forests and enhance their carbon-sequestration capacity. This review aims to summarize the experience of using mineral fertilizers in boreal and temperate forests. It is concluded that fertilization should be selective, and it is most effective in combination with other forest management operations. A significant effect is observed on sites with medium-productivity conditions on sites with sufficient, but not excessive moisture, at the age of the maximum current increment of biomass or commercial wood (40–70 years for coniferous species). The most common (inexpensive, but effective) are N-fertilizers, but it is necessary to control the content of other nutrients, in particular P, K and B. We have collected and published a database of long-term experiments on the application of mineral fertilizers. Experiments have shown that the absorption of 1 t of CO<sub>2</sub>-eq. requires from 5.6 to 10.3 kg (on average 7.2) of nitrogen. The results of a fertilizer application project should be compared against the baseline (without fertilizer application), and the difference can be counted in emission reduction units.

*Keywords:* nitrogen, phosphorus, potassium, increment, carbon uptake, forest growth, carbon sequestration.