

ISSN 0002-1881

**Август 2024**

**Номер 8**



# АГРОХИМИЯ



**НАУКА**

— 1727 —

# СОДЕРЖАНИЕ

Номер 8, 2024

Роль биологического азота в земледелии России

*А. А. Завалин, Л. А. Свиридова*

3

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

### Плодородие почв

Агрохимическая оценка продукционного потенциала почв прибрежных понижений пульсирующих высокоминерализованных хлоридных озер Улдза-Торейского бессточного бассейна

*Л. Л. Убугунов, Т. А. Аюшина, В. И. Убугунова, А. Д. Жамбалова,  
В. Л. Убугунов, О. В. Вишнякова*

9

### Удобрения

Оптимальные дозы фосфорных удобрений для зерновых агроценозов Приобья

*С. А. Колбин, А. А. Данилова, А. Г. Рахленко*

19

Урожайность яровой пшеницы и качество зерна при эффективном применении минеральных удобрений

*О. В. Волынкина*

27

Эффективность минеральной системы удобрения с разной насыщенностью в звене льняного севооборота

*Н. Н. Кузьменко*

37

Управление продуктивностью льна-долгунца путем оптимизации минерального питания

*О. Ю. Сорокина*

42

### Регуляторы роста растений

Биологическая активность гуминовых веществ торфа в качестве ростостимулирующих препаратов

*О. В. Броварова*

50

### Пестициды

Эффективность пеларгоновой кислоты в качестве гербицида в посевах подсолнечника, сои и кукурузы

*А. С. Голубев*

57

Экспериментальная и теоретическая оценка фунгицидной и бактерицидной активности 3-алкилзамещенных 1*H*-фосфолан оксидов

*Т. В. Тюпкина, К. А. Булатова, Д. Н. Исламов, А. Л. Махаматханова,  
М. И. Маллябаева, Д. Ш. Сабиров*

63

### Агроэкология

Влияние возрастающих доз отходного мела на содержание цинка в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве и его накопление растениями. Эмпирические модели транслокации цинка в растения семейств злаковых, бобовых и капустных

*А. В. Литвинович, А. В. Лаврищев, В. М. Буре, А. О. Ковлева*

75

Эффективность микроэлементов и регуляторов роста растений в сочетании с минеральными удобрениями при возделывании озимой пшеницы и ярового ячменя на дерново-подзолистой почве

*Е. Н. Старостина, Г. А. Иващенко*

83

Протеазная активность мучнисто-карбонатных черноземов при разных типах землепользования

*Э. О. Чимитдоржиева*

88

### Экотоксикология

Нитраты и тяжелые металлы в агроценозах при длительном применении органических удобрений

*Г. Е. Мерзлая*

95

# Contents

---

---

**No. 8, 2024**

---

---

Role of Biological Nitrogen in Agriculture in Russia

*A. A. Zavalin, L. A. Sviridova*

3

---

## EXPERIMENTAL ARTICLES

### Soil Fertility

Agrochemical Assessment of Productive Potential of Soils of Coastal Depressions of Pulsating Highly Mineralized Chloride Lakes of the Uldza–Torey Drainless Closed Basin

*L. L. Ubugunov, T. A. Ayushina, V. I. Ubugunova, A. D. Zhambalova, V. L. Ubugunov, O. V. Vishnyakova*

9

---

### Fertilizers

Optimal Dose of Phosphorus Fertilizers for Grain Agrocenoses in Ob Region

*S. A. Kolbin, A. A. Danilova, A. G. Rakhlenko*

19

Yield of Spring Wheat and Grain Quality with the Effective Use of Mineral Fertilization

*O. V. Volynkina*

27

Effectiveness of the Mineral Fertilizer System with Different Saturation in the Link of the Flax Crop Rotation

*N. N. Kuzmenko*

37

Managing the Productivity of Flax by Optimizing Nutrition

*O. Yu. Sorokina*

42

---

### Plant growth regulators

The Study of the Biological Activity of Humic Substances of Peat as Growth-Stimulating Drugs

*O. V. Brovarova*

50

---

### Pesticides

Effectiveness of Pelargonic Acid as a Herbicide in Sunflower, Soybean and Corn Crops

*A. S. Golubev*

57

Experimental and Theoretical Evaluation of Fungicidal and Bactericidal Activity of 3-Alkyl substituted 1*H*-phospholane Oxides

*T. V. Tyumkina, K. A. Bulatova, D. N. Islamov, A. L. Makhamatkhanova, M. I. Mallyabaeva, D. Sh. Sabirov*

63

---

### Agroecology

Effect of Increasing Doses of Waste Chalk on the Zinc Content in Sod-Podzolic Light Loamy Soil and Its Accumulation by Plants. Empirical Models of Zinc Translocation into Plants of the Cereal, Legume and Cabbage Families

*A. V. Litvinovich, A. V. Lavrishchev, V. M. Bure, A. O. Kovleva*

75

Effectiveness of Trace Elements and Plant Growth Regulators in Combination with Mineral Fertilizers in the Cultivation of Winter Wheat and Spring Barley on Sod-Podzolic Soil

*E. N. Starostina, G. A. Ivashenkov*

83

Protease Activity of Mealy-Carbonated Chernozems under Different Types of Land Use

*E. O. Chimitdorzhieva*

88

---

### Ecotoxicology

Nitrates and Heavy Metals in Agrocenoses with Prolonged Use of Organic Fertilizers

*G. E. Merzlaya*

95

---

---

## РОЛЬ БИОЛОГИЧЕСКОГО АЗОТА В ЗЕМЛЕДЕЛИИ РОССИИ

© 2024 г. А. А. Завалин<sup>1,\*</sup>, Л. А. Свиридова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии

им. Д. Н. Прянишникова

127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

\*E-mail: zavalin.52@mail.ru

Оценили баланс азота, используемый для формирования урожая сельскохозяйственных культур, и долю в нем биологического азота. Получены новые данные о вкладе биологического азота в агроэкосистемы России, которые показали, что в общем поступлении азота ( $\approx 3$  млн т действующего вещества) доля биологического составляет 34.7%, что в 3 раза больше азота, поступившего с органическими удобрениями (11.6%). В составе биологического азота половина (50.1%) принадлежит азоту, фиксированному в посевах многолетних бобовых трав. Количество азота, фиксированного в посевах сои, составило 23.1, зернобобовых культур – 19.3%. За последние 15 лет количество симбиотического азота возросло с 544.3 до 1025.7 тыс. т или в 1.88 раза за счет увеличения посевных площадей бобовых культур и роста их урожайности. Поступление биологического азота зернобобовых увеличилось в 2.55 раза, сои – в 2.91 и многолетних бобовых трав – в 1.69 раза при снижении доли азота, фиксированного в посевах однолетних трав. Для формирования урожая сельскохозяйственными растениями потребляется 5.38 млн т азота, а вынос азота с отчуждаемой частью урожая достигает 3.24 млн т/год. В земледелии России в среднем за год поступает в почву азота  $\approx 3$  млн т вместе с минеральными, органическими удобрениями, а также в составе биологического азота. При расчете затрат азота на формирование всего урожая баланс азота формируется резко отрицательным ( $-2.44$  т/га/год). При расчетах затрат азота на товарную часть среднегодовой баланс становится близким к оптимальному ( $-0.30$  т/га/год).

*Ключевые слова:* биологический азот, бобовые культуры, азотфиксация.

**DOI:** 10.31857/S0002188124080019, **EDN:** CETGAO

### ВВЕДЕНИЕ

Азот среди элементов минерального питания растений находится в первом минимуме в большинстве агроэкосистем. Оптимизация азотного питания растений была и остается одной из центральных проблем земледелия. Д. Н. Прянишников в своей классической работе “Азот в жизни растений и земледелии СССР” отмечал, что решение проблемы азота должно состоять в сочетании 2-х путей: повышении обеспеченности минеральными удобрениями и максимальном использовании биологического азота за счет расширения использования культур-азотособирателей [1]. Биологическая фиксация является одним из важнейших процессов трансформации атмосферного азота в биосфере, имеет планетарное значение и сопоставима по масштабам с фотосинтезом. Все большее распространение получает мнение, что устойчивость мирового земледелия и рост продуктивности растениеводства невозможны без усиления деятельности в почве микроорганизмов-азотфиксаторов. Не вызывает сомнений, что роль

и вклад биологического азота в растениеводство XXI века будут неуклонно возрастать [2].

Потребление элементов питания и вынос их с отчуждаемой частью урожая должен компенсироваться их внесением с минеральными, органическими удобрениями и другими источниками. Применение минеральных удобрений в России растет, за последние 6 лет оно практически удвоилось [3]. В долгосрочной перспективе цена и спрос на удобрения будут только расти вне зависимости от экономических факторов. Это обусловлено тем, что объем потребляемых удобрений напрямую связан с развитием сельского хозяйства и увеличением населения планеты. В перспективе ожидается рост производства биотоплива, при производстве которого будут необходимы удобрения [4]. Другим ресурсом азота, требуемого для формирования урожая сельскохозяйственных культур, являются органические удобрения. И еще одним источником поступления азота в земледелие служит биологический, фиксированный микроорганизмами, атмосферный азот: свободноживущими в почве, в симбиозе с бобовыми культурами, в ассоциации

с небобовыми растениями, эпифитами и эндофитами растений [5].

Биологический азот потребляется растением в течение всей вегетации, и это исключает избыточное накопление и загрязнение сельскохозяйственной продукции и окружающей среды [6]. Фиксированный азот усваивается растениями практически полностью. Азотфиксирующая способность выявлена у более половины бактерий, выделенных из ризосферы и филлосферы небобовых растений [5]. К настоящему времени азотфиксирующая способность обнаружена практически у всех групп прокариот. Азотфиксация проходит во всех природных средах – в почвах, илах, пресных и соленых водоемах, на поверхности и внутри стеблей и корней растений [2, 5, 7]. При широком распространении в почвах ассоциативной азотфиксации ее размеры зависят от наличия и разнообразия растительности и также от уровня окультуренности почв. По данным [8], в хорошо окультуренных почвах под рисом азотфиксация достигает в среднем 45–80 кг N/га/год, под пшеницей и кукурузой на красноземах – 20 и 10 кг N/га/год соответственно. В дерново-подзолистых почвах под посевами вегетирующих злаковых культур размер ассоциативной и несимбиотической азотфиксации составляет 40–55 кг N/га, под паром и в междурядьях – 10–13 кг/га/год. По данным других авторов [9], ассоциативная азотфиксация в зоне умеренного климата достигает 50–150 кг N/га.

Расчетные размеры симбиотической азотфиксации составляют от 130 до 390 кг N/га в посевах зернобобовых культур и от 270 до 550 кг N/га в агроценозах многолетних бобовых трав [10]. Этот азот играет важную роль в снабжении бобовых растений азотом, а пожнивные и корневые остатки после минерализации и перехода органических соединений в доступные формы используются последующими культурами севооборота [11].

Цель работы – оценить долю биологического азота в общем балансе азота в земледелии России.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки роли бобовых культур в вовлечении биологического азота в агроценозы учитывали количество азота, которое накопилось в биомассе растений. Для этого использовали статистические сведения о посевных площадях и урожайности основной и побочной продукции зернобобовых, сои, многолетних, однолетних бобовых и бобово-злаковых трав [12]. При определении валовых сборов массы многолетних бобово-злаковых трав доля бобовых компонентов принята за 50% от общего урожая [13, 14]. При определении массы бобово-злаковых трав, убираемых на зеленый

корм, содержание сухого вещества принято для многолетних трав 25% (1/4 часть), для однолетних трав – 20% (1/5 часть). Соотношение зерна и соломы в урожае гороха, сои и других бобовых культур принимали как 1 : 3 [14]. Содержание общего и биологического азота в зерне бобовых культур и массе трав, а также побочной продукции (соломе), пожнивных и корневых остатках (ПКО) этих культур брали на основе обобщенных данных [13–15]. Многолетние бобово-злаковые травы распаивают примерно на половину от занимаемых площадей, что учтено в расчетах. По методикам, разработанным во ВНИИ агрохимии им. Д. Н. Прянишникова [13, 14], рассчитано накопление в почве органического вещества, общего и симбиотического азота при возделывании бобовых культур.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате анализа данных установлено, что накопление в биомассе общего и биологического азота определяются видом возделываемых сельскохозяйственных культур, величиной урожайности основной продукции, размерами посевных площадей. За последние годы площади под посевами бобовых культур в земледелии нашей страны по сравнению с предыдущим периодом (2005–2010 гг.) увеличились в 1.1 раза и составляют ≈17 млн га. При этом произошли изменения площадей, занятых отдельными культурами. Например, площадь под посевами зернобобовых культур возросла в 1.93 раза, сои – в 3.2 раза, многолетних трав – в 1.1 раза, при снижении в 1.02 раза площадей под однолетними травами. Естественно, увеличился среднегодовой валовой сбор зерна зернобобовых культур с 1.62 до 3.48 млн т, зерна сои – с 0.86 до почти 3.9 млн т. Произошло это не только за счет увеличения посевных площадей, но и роста урожайности зернобобовых с 1.44 до 1.70 т/га и сои – с 1.00 до 1.60 т/га [12].

Накопление в биомассе зернобобовых культур общего и биологического азота отражено в табл. 1.

Общий азот в основной продукции составил >0.7 млн т, при этом значительное его количество было в фитомассе многолетних трав и зерне сои. В побочной продукции зернобобовых культур накопление общего азота достигло 181.3 тыс. т. В пожнивных и корневых остатках (ПКО) бобовых культур максимальное количество общего азота накоплено после уборки многолетних трав – 441.3 тыс. т, зернобобовых и сои – 242.0 тыс. т.

С учетом коэффициента азотфиксации [13] для каждой из выращиваемых бобовых культур рассчитано количество биологического азота, находящегося в основной, побочной продукции и ПКО, суммарное количество которого превышает 1 млн т,

**Таблица 1.** Среднегодовое накопление общего и биологического азота в биомассе бобовых культур (2018–2022 гг.)

Культура	Площадь, тыс. га	Валовой сбор, млн т	Накопление N <sub>общ</sub>				N <sub>биол</sub>			
			тыс. т							
			основная продукция	побочная продукция	ПКО	всего	основная продукция	побочная продукция	ПКО	всего
Зернобобовые	2169.56	3485.6	139.4	82.4	109.4	331.2	83.7	49.4	65.6	198.7
Соя	2752.04	3886.8	163.2	98.9	132.6	394.7	97.9	59.3	79.6	236.8
Однолетние травы на сено	1065.7	2426.6	44.2	–	2.3	46.5	28.7	–	1.5	30.2
Однолетние травы на зеленую массу	2131.3	19 182.5	69.1	–	3.6	72.7	44.9	–	2.3	47.2
Многолетние травы на сено	5606	8769.6	156.1	–	230.2	386.3	109.3	–	161.1	270.4
Многолетние травы на зеленую массу	2804	33 779.2	135.1	–	211.1	346.2	94.6	–	147.8	242.4
Сумма	16 528.6	–	707.1	181.3	689.2	1577.6	459.0	107.8	457.9	1025.7

**Таблица 2.** Вклад бобовых культур в накопление гумуса и биологического азота в почве (среднее за год, 2018–2022 гг.), тыс. т

Культуры	Гумус	Биологический азот
Зернобобовые	1958.3	115.0
Соя	2183.7	138.9
Однолетние травы на сено	528.8	1.5
Однолетние травы на зеленую массу	824.4	2.3
Многолетние травы на сено	4977.3	161.1
Многолетние травы на зеленую массу	2282.4	147.8
Итого	12 571.9	566.6

или составляет 65% от содержания общего азота в биомассе. Из общего количества биологического азота максимальная доля приходится на многолетние травы (50%). Примерно одинаковое количество в сое (23%) и зернобобовых культурах (20%), на долю однолетних трав приходится 7%.

Накопление гумуса после уборки однолетних бобовых культур и заделки многолетних трав, массы пожнивных и корневых остатков достигает 12.5 млн т в среднем за год. Максимальные величины этого показателя в среднем за год для всех зернобобовых культур равны 0.77 т/га (табл. 2).

Среднегодовое накопление биологического азота в почве после бобовых культур составляет 566.6 тыс. т. Значительное количество биологического азота остается в почве после заделки многолетних трав и уборки зернобобовых культур и сои. Этот азот в результате минерализации органического вещества становится доступным для последующих культур севооборота.

Включение бобовых культур в структуру посевных площадей оказывает положительное влияние на экономические составляющие растениеводства. В среднем за последние годы в стране производили 4.42 млн т растительного белка за счет бобовых культур, это в 1.89 раза больше (2.34 млн т) по сравнению с предыдущим периодом (2005–2010 гг.). Количество растительного белка при выращивании зернобобовых культур составило 0.87, сои – 1.02, многолетних и однолетних трав – 2.53 млн т. Вовлечение в земледелие биологического азота (1025.7 тыс. т) эквивалентно по действующему веществу 3.01 млн т аммиачной селитры и в денежном выражении с учетом рыночной цены [16] на эту форму удобрения составило ≈65.2 млрд руб. Экономия условного топлива при использовании в земледелии биологического азота в объеме 1025.7 тыс. т в эквиваленте аммиачной селитры составляет 2.82 млн т [11].

Использование биопрепаратов на основе ассоциативных азотфиксаторов в агротехнологиях выращивания сельскохозяйственных культур постоянно увеличивается, что обеспечивает вовлечение биологического азота  $\approx 10\text{--}15$  кг/га. Ассоциативные азотфиксаторы распространены во всех почвах, за счет них вовлекается в среднем от 20 до 30 кг N/га/год [5]. Поступление азота с атмосферными осадками с учетом географических условий и размещения промышленных предприятий оценивается в среднем 5 кг N/га [18]. Поступление в почву биологического азота, фиксируемого свободноживущими бактериями, согласно ранее приведенных нормативов [19–21] составляет 10–12 кг N/га/год при внесении минеральных и органических удобрений и 6 кг N/га/год без их внесения. При расчете баланса азота в данном случае принята величина азотфиксации за счет свободноживущих микроорганизмов 7.5 кг N/га. На посевной площади  $\approx 80$  млн га поступление азота составляет 0.6 млн т за счет свободноживущих азотфиксирующих микроорганизмов. За счет ассоциативной азотфиксации вовлекается 2 млн т азота (при расчете 25 кг фиксированного N/га). С атмосферными осадками дополнительно поступает еще  $\approx 0.4$  млн т, что в сумме составляет 2 млн т азота.

Также стоит затронуть вопрос о газообразных потерях азота. Размеры образования и выделения газообразных соединений зависят от температурного режима, влажности, аэрации почвы, pH, способности органического вещества к минерализации, содержания минерального азота и связаны с агротехникой, дозами удобрений, известкованием, применением биопрепаратов. При возделывании многолетних бобово-злаковых трав в виде газообразных соединений теряется симбиотического азота до 50–100 кг/га. При внесении минеральных удобрений потери азота достигают 30–40% от внесенной дозы азотных удобрений 60–120 кг/га (в среднем 18–48 кг/га). В среднем потери азота принимаем для расчетов в размере 50 кг/га. На посевной площади  $\approx 80$  млн га расчетные потери азота могут составлять 4 млн т.

Объем поступления несимбиотического биологического азота и с атмосферными осадками в настоящее время, к сожалению, не учитывают при оценке баланса азота в земледелии России, как и потери азота в виде газообразных соединений.

**Таблица 3.** Среднегодовое накопление азота, фосфора и калия в урожае сельскохозяйственных культур и их отчуждение с массой основной продукции (2018–2022 гг.), млн т

Показатель	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Сумма
Потребность в элементах питания для формирования урожая	5.38	1.82	5.88	13.08
Отчуждение с товарной частью урожая	3.24	1.15	1.16	5.55

Для формирования урожая сельскохозяйственных культур на всей посевной площади в среднем за год необходимо  $>5$  млн т азота,  $\approx 2$  млн т фосфора и  $\approx 6$  млн т калия (табл. 3).

Однако не весь объем накопленных элементов питания в биомассе отчуждается с поля, поскольку побочная продукция остается, и находящиеся в ней объемы НРК возвращаются в почву. Рассчитаны размеры отчуждения элементов питания с удаляемой с поля основной продукцией, составляющие  $>3$  млн т азота, чуть более 1 млн т фосфора и столько же калия.

Внесение минеральных удобрений в Российской Федерации в 2018 г. составило 2.5, в 2019 г. – 2.7, в 2020 г. – 3.1, в 2021 г. – 3.3, в 2022 г. – 3.4 млн т, в их составе азотные удобрения составляли  $\approx 63\%$  [22]. Среднегодовое внесение минеральных удобрений за последние 5 лет составило 3.03 млн т, в том числе азотных – 1.88 млн т д.в.

С учетом прихода азота в составе минеральных удобрений (1.58 млн т), органических удобрений (0.34 млн т) и биологического азота, фиксированного в посевах бобовых культур (1.02 млн т), всего поступало  $\approx 3$  млн т азота. Этот объем не учитывает поступление на поля азота, фиксированного свободноживущими микроорганизмами, поступление в результате применения биопрепаратов, созданных на основе активных штаммов ассоциативных микроорганизмов, и азота, поступившего с атмосферными осадками.

При выносе азота с полей с отчуждаемой частью урожая, равном 3.24 млн т (при общих затратах азота на формирование урожая 5.38 млн т), среднегодовой хозяйственный баланс равняется  $-0.3$  млн т (табл. 4), т.е. практически баланс приближается к равновесному состоянию.

В России для формирования урожая сельскохозяйственных культур поступление симбиотического биологического азота составляет 34.7%, азота в составе органических удобрений – 11.6%, доминирующее значение имеют минеральные удобрения – 53.7%.

В накоплении биологического азота в настоящее время основная доля принадлежит многолетним травам, которая по сравнению с предыдущим периодом снизилась на 6% (табл. 5).

**Таблица 4.** Среднегодовой баланс азота в земледелии России (2018–2022 гг.), млн т

Расход	Поступление	Баланс
Потребление азота для формирования урожая сельскохозяйственных культур – 5.38	Минеральные азотсодержащие удобрения – 1.58 Органические удобрения – 0.34 Симбиотический азот – 1.02	–2.44
В т.ч. отчуждение (вынос) азота с отчуждаемой частью урожая – 3.24	Поступило всего – 2.94	–0.30

**Таблица 5.** Среднегодовое накопление биологического азота при возделывании бобовых культур

Культуры	2005–2010 гг.		Современное состояние (2018–2022 гг.)		Рост накопления биологического азота, раз
	тыс. т	%	тыс. т	%	
Зернобобовые	77.9	14.3	198.7	19.3	2.55
Соя	81.3	14.9	236.8	23.1	2.91
Однолетние травы	81.8	15.1	77.4	7.5	0.58
Многолетние травы	303.3	55.7	512.8	50.1	1.69
Всего	544.3	100	1025.7	100	1.88

В последние годы по сравнению с периодом 2005–2010 гг. в накоплении биологического азота существенно возросла доля сои и зернобобовых культур, что связано с увеличением их посевных площадей. Суммарное накопление биологического азота в настоящее время по сравнению с периодом 2005–2010 гг. возросло в 1.88 раза, при этом максимальный рост произошел при выращивании сои – в 2.91 раза, зернобобовых – в 2.55 раза и многолетних трав – в 1.69 раза. При этом снизилась доля однолетних трав.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ состояния баланса азота в земледелии Российской Федерации показал, что в общем поступлении азота доля биологического (симбиотического) составляет 34.7, органических удобрений – 11.6 и минеральных удобрений – 53.7%. Половина (50.1%) биологического азота принадлежит азоту многолетних трав, 23.1% – азоту, фиксированному в посевах сои, и 19.3% – зернобобовых культур, на долю однолетних трав приходится 7.5%. За последние 15 лет количество симбиотического азота возросло с 544.3 до 1025.7 млн т, или в 1.88 раза. Произошло это за счет увеличения биологического азота зернобобовых (2.55 раза), сои (2.91 раза), многолетних бобовых трав (1.69 раза), при снижении вклада однолетних бобовых трав.

Для формирования урожая сельскохозяйственными растениями потребляется 5.38 млн т азота, а вынос азота с отчуждаемой частью урожая достигает 3.24 млн т/год. В России в пахотные земли в среднем за год поступает с минеральными, органическими удобрениями и биологического азота

≈3 млн т. Баланс азота формируется резко отрицательным (–2.44 т N/га/год) при расчете затрат азота на формирование всего урожая. При расчетах затрат азота на товарную часть среднегодовой баланс становится близким к оптимальному (–0.30 т/га/год).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Прянишников Д.Н.* Азот в жизни растений и в земледелии СССР. Избр. соч. М.: Изд-во АН СССР, 1951. Т. 1. С. 47–156.
2. *Умаров М.М.* Азотфиксация в ассоциациях организмов // Пробл. агрохим. и экол. 2009. № 2. С. 22–26.
3. <https://rapu.ru/analytics/> (дата обращения: 10.01.2024).
4. *Кирюшин В.И.* Управление плодородием почв и продуктивностью агроценозов в адаптивно-ландшафтных системах земледелия // Почвоведение. 2019. № 9. С. 1130–1139.
5. *Завалин А.А., Алферов А.А., Чернова Л.С.* Ассоциативная азотфиксация и практика применения биопрепаратов в посевах сельскохозяйственных культур // Агрохимия. 2019. № 8. С. 83–96.
6. *Лактионов Ю.В., Кожемяков А.П., Яхно В.В., Корчагин В.И., Сумина Н.А.* Урожайность и качество сельскохозяйственной продукции при использовании биопрепаратов // Агромир Черноземья. 2013. № 1–2(103). С. 24–25.
7. What are endophytes? // *Microbial Root Endophytes* / Eds. Schulz B., Boyle C.J.C., Sieber T.N. Berlin: Springer-Verlag, 2006. P. 191–206.
8. *Умаров М.М.* Ассоциативная азотфиксация. М.: Изд-во МГУ, 1986. 136 с.

9. Феоктистова Н.В., Марданова А.М., Хадиева Г.Ф., Шарипова М.Р. Ризосферные бактерии // Уч. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2016. Т. 158. Кн. 2. С. 207–224.
10. Кокорина А.Л., Кожемяков А.П. Бобово-ризобиальный симбиоз и применение микробиологических препаратов комплексного действия – важный резерв повышения продуктивности пашни. СПб.: СПГАУ, 2010. 50 с.
11. Завалин А.А. Биологический и минеральный азот в земледелии России. М.: ВНИИА, 2022. 256 с.
12. [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/29\\_cx\\_predv\\_2022.xlsx](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/29_cx_predv_2022.xlsx) (дата обращения: 11.01.2024).
13. Завалин А.А., Благовещенская Г.Г., Чернова Л.С. Нормативы для определения вклада биологического азота бобовых в баланс азота России. М.: ВНИИА, 2013. 44 с.
14. Треначев Е.П. Агрохимические аспекты биологического азота в современном земледелии. М.: Агроконсалт, 1999. 532 с.
15. Завалин А.А., Благовещенская Г.Г. Вклад биологического азота бобовых культур в азотный баланс земледелия // Агрохимия. 2012. № 6. С. 32–37.
16. <https://agroualmarket.promportal.su/> (дата обращения: 11.01.2024).
17. Алферов А.А. Ассоциативный азот, урожай и устойчивость агроэкосистемы. М.: РАН, 2020. 184 с.
18. Бюллетень Географической сети опытов с удобрениями. Вып. 14. Влияние дождевых осадков на загрязнение сельскохозяйственных угодий (по данным локального мониторинга). М.: ВНИИА, 2013. 30 с.
19. Методические рекомендации по изучению показателей плодородия почв, баланса гумуса и питательных веществ в длительных опытах. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1987. 80 с.
20. Методические указания по определению баланса питательных веществ азота, фосфора, калия, гумуса, кальция. М.: ЦИНАО, 2000. 40 с.
21. Методические указания по проведению длительных опытов с удобрениями. Ч. 1. Особенности закладки и проведения длительных опытов в различных условиях. М.: ВИУА, 1986. 146 с.
22. [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Vnesen\\_udobren\\_2022.xlsx](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Vnesen_udobren_2022.xlsx) (дата обращения: 10.01.2024).

## Role of Biological Nitrogen in Agriculture in Russia

A. A. Zavalin<sup>a, #</sup>, L. A. Sviridova<sup>a</sup>

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

<sup>#</sup>*E-mail: zavalin.52@mail.ru*

The nitrogen balance used to form the crop yield and the proportion of biological nitrogen in it were evaluated. New data on the contribution of biological nitrogen to the agroecosystems of Russia have been obtained, which showed that in the total nitrogen intake ( $\approx 3$  million tons of active substance) the share of biological nitrogen is 34.7%, which is 3 times more than nitrogen supplied with organic fertilizers (11.6%). In the composition of biological nitrogen, half of it (50.1%) belongs to nitrogen fixed in crops of perennial legumes. The amount of nitrogen fixed in soybean crops was 23.1%, and leguminous crops – 19.3%. Over the past 15 years, the amount of symbiotic nitrogen has increased from 544.3 to 1025.7 thousand tons, or 1.88 times due to an increase in the acreage of legumes and their yield. The intake of biological nitrogen from legumes increased by 2.55 times, soybeans – by 2.91, and perennial legumes – by 1.69 times with a decrease in the proportion of nitrogen fixed in crops of annual grasses. Agricultural plants consume 5.38 million tons of nitrogen to form a crop, and nitrogen removal from the alienated part of the crop reaches 3.24 million tons/year. In agriculture in Russia, on average,  $\approx 3$  million tons of nitrogen enters the soil per year together with mineral and organic fertilizers, as well as as part of biological nitrogen. When calculating the cost of nitrogen for the formation of the entire crop, the nitrogen balance is formed sharply negative ( $-2.44$  t/ha/year). When calculating nitrogen costs for the commodity part, the average annual balance becomes close to optimal ( $-0.30$  t/ha/year).

*Keywords:* biological nitrogen, legumes, nitrogen fixation.

УДК 631.41:631.445(571.54)

## АГРОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОДУКЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА ПОЧВ ПРИБРЕЖНЫХ ПониЖЕНИЙ ПУЛЬСИРУЮЩИХ ВЫСОКОМИНЕРАЛИЗОВАННЫХ ХЛОРИДНЫХ ОЗЕР УЛДЗА-ТОРЕЙСКОГО БЕССТОЧНОГО БАССЕЙНА

© 2024 г. Л. Л. Убугунов<sup>1,2,\*</sup>, Т. А. Аюшина<sup>1</sup>, В. И. Убугунова<sup>1</sup>, А. Д. Жамбалова<sup>1</sup>,  
В. Л. Убугунов<sup>1</sup>, О. В. Вишнякова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН  
670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия

<sup>2</sup>Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова  
670010 Улан-Удэ, ул. Пушкина, 8, Россия

\*E-mail: l-ulze@mail.ru

Изучили почвенное разнообразие прибрежных понижений пульсирующих высокоминерализованных хлоридных озер Улдза-Торейского бессточного бассейна (на примере оз. Бабье) на территории юго-восточного Забайкалья. Установлено, что оно представлено 3-мя основными типами почв — солончаками квазиглеевыми, гумусово-квазиглеевыми засоленными и светлогумусовыми засоленными почвами. Исследованные почвы, особенно солончак квазиглеевый, характеризовались неблагоприятными физико-химическими и агрохимическими свойствами и высокой степенью засоленности большинства горизонтов с избыточным содержанием токсичных  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ . В солончаке квазиглеевом выявлен очень высокий уровень концентрации N, Ca, Mg, S и ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  в верхнем солончаковом слое (0–5 см). В исследованных почвах установлено низкое содержание большинства важнейших элементов питания, в том числе доступных для растений форм азота и фосфора, а для гумусово-квазиглеевой засоленной и светлогумусовой засоленной почв — еще и биогенных микроэлементов. Поэтому они обладают, исходя из агрохимической оценки их продукционного потенциала, крайне незначительным уровнем как потенциального, так и эффективного плодородия. Учитывая экологическую уникальность и лечебную ценность озера и его приозерных экосистем, рекомендуется полное выведение данных почвенно-земельных ресурсов из сельскохозяйственного оборота. Их необходимо использовать в виде особо охраняемых природных компонентов ландшафта в составе воспроизводственных участков, заказников, заповедников, территорий лечебно-бальнеологических курортов и других внекурортных здравниц.

**Ключевые слова:** соленые озера, прибрежные понижения, почвы, агрохимические свойства, макро- и микроэлементы, оценка плодородия, Забайкалье.

**DOI:** 10.31857/S0002188124080025, **EDN:** CEPYPS

### ВВЕДЕНИЕ

Формирование и функционирование экосистем во многом зависят от состояния почвенных ресурсов территории. В связи с этим продукционный потенциал почв является важнейшим фактором, обеспечивающим биоразнообразие и воспроизводство биологических ресурсов и в целом — экологическую устойчивость всего биогеоценоза.

Для сохранения и повышения устойчивости почвенно-растительного покрова и недопущения деградации земельных ресурсов в условиях глобальных климатических изменений и усиливающегося антропогенного воздействия необходимы

мониторинговые исследования, учитывающие комплекс агрохимических свойств и уровень плодородия почв не только используемых в сельскохозяйственном производстве земель, но и имеющих эколого-охранную значимость природно-уникальных экосистем.

Неблагоприятные экосистемные последствия изменения климата, выражающиеся прежде всего в его потеплении и связанных с ним аридизацией и последующим опустыниванием ландшафтов, особенно наглядно начинают проявляться на обширной и экологически неустойчивой трансграничной территории бессточного Улдза-Торейского

бассейна, включающего регионы Российской Федерации (юго-восточное Забайкалье, Даурия), Монголии (Восточно-Монгольская равнина) и Китая (Внутренняя Монголия). Этому способствуют резко континентальный климат, малое количество осадков, маломощность и неблагоприятные для экологической устойчивости и плодородия свойства основных типов зональных почв. В долинах рек и приозерных понижениях данные негативные последствия усиливаются из-за существенной доли засоленных и заболоченных почв и происходящими процессами вторичного засоления и/или заболачивания.

Территория данного бассейна характеризуется наличием многочисленных ( $\approx 5000$ ) бессточных соленых и солоноватых озер различного химического состава и разной степени минерализации [1–3]. Для них характерны происходящие циклические гумидные (трансгрессивные) и аридные (регрессивные) климатические фазы протяженностью примерно в 25–30 лет. Все озера расположены в замкнутых понижениях и имеют характер концевых бассейнов, аккумулирующих атмосферные и грунтовые воды с близлежащих окружающих территорий. Большинство из них являются небольшими водоемами с малой глубиной даже в многоводные годы, а в аридные периоды наблюдается их существенное обезвоживание или даже полное усыхание. По химизму засоления значительная часть водоемов характеризуются содовым (87%), меньшая – хлоридным (10%) и сульфатным (3%) типами засоления [4].

Непосредственно сами водоемы и их приозерные территории имеют большую экологическую и кормовую значимость, т.к. являются местом локализации и гнездования многочисленных местных и перелетных птиц [5], формирования и функционирования специфического разнообразия мелких млекопитающих и почвенных беспозвоночных [6, 7], водорослей [8, 9] и микробных сообществ [10, 11]. Исследований почвенного покрова прибрежных ландшафтов этих озер проведено крайне мало. В имеющихся материалах целью исследований были только территории, прилегающие к озерам содового или близкого к содовому типам засоления [12–14]. Каких-либо данных о почвах приозерных территорий водоемов с хлоридным засолением и уровне их плодородия в литературе не обнаружено.

Цель работы – исследовать характеристики основных свойств и плодородия ландшафтно доминирующих типов почв прибрежных понижений пульсирующих хлоридных озер Улдза-Торейского бессточного бассейна в стадии выраженной регрессивной климатической фазы и дать агрохимическую оценку их продукционного потенциала.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на территории Улдза-Торейского бессточного бассейна в юго-восточном Забайкалье (Даурия), где в междуречьях р. Онона, Аргуни и их притоков расположено несколько сотен различных соленых и солоноватых озер [1]. Объектами исследования были выбраны почвы прибрежных экосистем высокоминерализованного хлоридного о. Бабье (N50.296291, E116.379090). Само озеро представляет собой бессточный водоем с изменяющейся площадью от 0.35 до 1.3 км<sup>2</sup> и находящимися на дне грязями, широко используемыми местным населением в лечебных целях. Для водоема также характерны циклические климатические изменения, которые существенным образом отражаются и на почвенном покрове прилегающих к озеру ландшафтов. В период исследования наблюдали выраженную регрессивную стадию, площадь озера была минимальной (0.3513 км<sup>2</sup>), глубина – незначительной (5–30 см). Произошло заметное уменьшение водной глади, повышение солености вод и величин щелочности (рН<sub>H<sub>2</sub>O</sub> до 8.9 ед.), наблюдали выраженную активизацию процессов засоления, увеличение площади солончаков и других процессов, связанных с циклической стадией аридизации климата [13, 15].

По морфоструктурному районированию территория Улдза-Торейского бессточного бассейна относится к обширной Восточно-Забайкальской депрессии [16]. Она расположена между разновозрастными и разнородными Борзинским, Уртуйским и Ононским террейнами [17], породы которых включают разнообразные осадочные и вулканогенно-осадочные образования [18]. Для климата региона характерна резкая континентальность, недостаточное количество суммы атмосферных осадков, меняющееся в различные годы в пределах 150–400 мм. Для осадков специфично преобладающее выпадение в июльско-августовский период. По ботанико-географическому районированию растительный покров прилегающих территорий относится к Монгольской степной провинции Центральноазиатской степной подобласти Евразии с преобладанием крыловоковыльных степей [19]. Основной чертой структуры растительности приозерных понижений является наличие концентрических поясов (полосности) вокруг водоема. В эпицентрах соленакопления формируются резко выраженные галофитные сообщества. Далее, в зависимости от условий увлажнения, засоленности и удаленности от водной глади озера, формируются бескильничевые, ползучеосоковые, ячменные, полынные сообщества, востречовые луга, сазовые степи. В засушливых циклических фазах отмечают возрастание площади галофитных лугов и пионерной галофитной растительности с доминированием однолетних маревых видов [20–22].

В качестве объекта исследования были выбраны 3 ключевых участка на супераквально-субаквальных, супераквальных и элювиально-супераквальных позициях в ландшафтах приозерного понижения. На каждом из них было заложено по 1-му опорному разрезу и по 3 – вспомогательных. Классификацию и диагностику почв проводили по [23, 24]. Морфологическое описание ключевых разрезов и некоторые основные свойства приведены нами ранее [25].

Гранулометрический состав определяли методом Качинского,  $pH_{H_2O}$  – методом ионометрии на приборе Экотест-120, содержание свободных карбонатов – газоволюметрическим методом, содержание гумуса – по Тюрину, обменных катионов – по Пфедферу в модификации Молодцова–Игнатовой. Физико-химические и агрохимические свойства, содержание общего N,  $N-NO_3^-$  и  $N-NH_4^+$  определяли классическими методами [26–28]. Валовое содержание зольных элементов определяли в аккредитованной лаборатории “Республиканского аналитического центра” атомно-эмиссионным методом с индуктивно связанной плазмой (ICP) на спектрометре “SPECTROARCOS”. Подвижные формы элементов питания определяли на приборе AAS “SOLAAR M” экстракцией ацетатно-аммонийным буфером  $pH$  4.8.

В данном сообщении кратко приведены следующие сведения:

1. Разрез Б-1. Супераквально-субаквальная фация, в 50 м от существующей на настоящий момент береговой линии, растительное сообщество – соссуреево-сведовое, формула профиля: Sq (0–5 см) – Cs (5–22 см) – CQs (22–80 см), почва – солончак квазиглеевый;

2. Разрез Б-2. Супераквальная фация, в 153 м от береговой линии, растительное сообщество – бескильницево-полынно-ячменевое, формула профиля: AJs (0–18 см) – ACs–CQs (18–39 см) – CQs (39–65 см), почва – гумусово-квазиглеевая засоленная;

3. Разрез Б-3. Элювиально-супераквальная фация, в 400 м от береговой линии, растительное сообщество – ковыльное, формула профиля: AJ (0–39 см) – ACs (39–47 см) – Cs (47–60 см), почва – светлогумусовая засоленная.

Изученные почвы образуют генетически связанный ряд почв. На приближенных к водной глади территориях доминируют солончаки, формирующиеся под существенным влиянием высокоминерализованных хлоридных озерных вод (уровень грунтовых вод – 60 см). Гумусово-квазиглеевые почвы испытывают воздействие озерных вод только в гумидный (трансгрессивный) цикл, в аридный – практически очень слабое или косвенное (через

остаточные свойства). Светлогумусовые почвы, занимающие более высокие позиции в рельефе, в настоящее время не подвержены их влиянию.

Для солончака квазиглеевого характерна резкая смена гранулометрического состава: верхний тяжелосуглинистый 5-см слой, содержащий высокое количество илистой фракции (33%), сменяется песчаным (5–20 см) и глубже – среднесуглинистым с таким же высоким содержанием мелкодисперсных частиц (табл. 1).

Почвенная кислотность соответствовала щелочным и сильнощелочным показателям. Весь профиль сильно насыщен свободными карбонатами, причем их накопление в верхнем слое 0–5 см происходит за счет испарительного процесса, а в нижних озерных отложениях – гидрогенной аккумуляции. Содержание гумуса в почвах очень низкое, а резкое возрастание этого показателя в верхнем горизонте связано с активизацией деятельности цианобактериальных матов [10]. Максимальные величины суммы обменных оснований отмечены в поверхностном солончаковом горизонте (27.5 смоль(экв)/кг почвы), с глубиной они снижаются (12.8–17.3 смоль(экв)/кг почвы). В исследованной почве преобладают обменные натрий (от 68 до 44% от суммы оснований) и магний (от 25 до 31% от суммы оснований). Доля обменного кальция заметно меньше, калия – минимальная. Для солончака квазиглеевого характерно очень высокое содержание легкорастворимых солей: от 2.68% в слое 0–5 см до 0.76–0.47% – в нижележащих. При этом наблюдают неблагоприятный солевой состав и соотношение водорастворимых солей, среди которых преобладают токсичные соли – от 2.62 до 0.73–0.44% соответственно. Тип засоления – хлоридно-натриевый: в составе анионов резко доминирует  $Cl^-$  (70–88% от суммы анионов), среди катионов существенно преобладает  $Na^+$  – 91–94% суммы катионов.

Гумусово-квазиглеевая засоленная почва характеризуется неоднородным гранулометрическим составом: верхняя часть профиля (до 34–39 см) – супесчаная, нижняя – среднесуглинистая. Величины  $pH_{H_2O}$  свидетельствуют, что она является щелочной и сильнощелочной. Содержание свободных карбонатов меняется от 1.6–1.9% в верхних слоях и 6.0% – в нижнем горизонте. Почва малогумусная, имеет слабую поглонительную способность. Состав обменных катионов в верхнем светлогумусовом горизонте (AJs) относительно благоприятный для произрастания растений, т.к. в нем преобладают  $Mg^{2+}$  и  $Ca^{2+}$ . Доля  $Na^+$  значительно меньше, но с глубиной его содержание значительно возрастает (до 53% от суммы). Гумусово-квазиглеевая почва содержит водорастворимые соли: по степени засоления верхняя часть профиля является

Таблица 1. Основные свойства приозерных почв оз. Бабье

Горизонт	Глубина, см	Содержание гранулометрических частиц, %		рН <sub>H2O</sub> , ед. рН	СО <sub>2</sub> карбонатов, %	Гумус, %	Сумма обменных оснований, смоль(экв)кг	Са <sup>2+</sup> , % от суммы	Mg <sup>2+</sup> , % от суммы	Na <sup>+</sup> , % от суммы	K <sup>+</sup> , % от суммы	Легкорастворимые соли, %	Токсичные соли, %
		<0.001 мм	<0.01 мм										
Разрез Б-1. Солончак квазиглеевый													
Sq <sup>~</sup>	0–5	33	54	8.4	8.4	4.84	27.5	7	25	68	0	2.68	2.62
Cs <sup>~</sup>	5–20	11	14	8.8	2.3	0.48	13.3	18	30	46	6	0.76	0.73
CQs <sup>~</sup>	20–30	28	37	8.5	7.8	0.64	17.3	16	25	57	1	0.60	0.57
2CQ <sup>~</sup>	30–80	33	41	8.2	9.4	0.45	12.8	22	31	44	3	0.47	0.44
Разрез Б-2. Гумусово-квазиглеевая засоленная почва													
AJs	0–15	9	14	8.6	1.9	1.22	9.8	33	53	11	3	0.10	0.08
ACs	15–34	13	15	9.7	1.6	0.29	11.1	22	22	53	3	0.32	0.27
QCs	34–65	26	31	9.6	6.0	0.42	12.4	19	26	53	2	0.23	0.20
Разрез Б-3. Светлогумусовая засоленная почва													
AJ	0–33	7	13	7.5	0.5	1.27	8.6	51	37	8	4	0.06	0.04
ACs	33–44	14	20	9.4	0.7	0.91	19.1	19	21	59	1	0.28	0.23
Cs	44–60	20	31	9.2	1.3	0.67	20.7	17	15	66	1	0.44	0.39

слабо-, а нижняя – средnezасоленной). Тип засоления (по наличию анионов в верхнем горизонте (AJs)) является содово-хлоридным, в нижних – хлоридно-содовым; по наличию катионов – натриевым. Содержание Cl<sup>-</sup> в данной почве на порядок меньше, чем в солончаке квазиглеевом. В составе водорастворимых катионов по всему профилю преобладает Na<sup>+</sup>. В гумусовом горизонте отмечают более благоприятное соотношение обменных Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> и Na<sup>+</sup>, которое составляет соответственно 33, 53 и 11% от суммы обменных оснований.

Светлогумусовая засоленная почва в слое 0–33(39) см супесчаная, с глубиной гранулометрический состав утяжеляется до озерных суглинистых осадочных отложений. Для горизонта AJ характерна слабощелочная реакция среды (рН<sub>H2O</sub> 7.5 ед.), в нижних она возрастает до сильнощелочной. Содержание СО<sub>2карб</sub> незначительное по сравнению с гумусово-квазиглеевой засоленной почвой и заметно уступает солончаку квазиглеевому. Почва малогумусная, характер распределения органического вещества – постепенно убывающий. Содержание обменных оснований – низкое в светлогумусовом горизонте, но вниз по профилю

возрастает до 20.7 смоль(экв)кг почвы. Состав обменных катионов в верхнем слое имеет оптимальное для плодородия соотношение, т.к. 88% приходится на Са<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup> и только 8% на Na<sup>+</sup>. Глубже по профилю обнаружено резкое увеличение обменного натрия (до 59–66% от суммы катионов). Для светлогумусовой почвы характерна дифференцированная степень засоления: гумусовый горизонт не засолен, а в нижних их количество значительно возрастает и соответствует средней (гор. Acs) и сильной (гор. Cs) степеням засоления за счет резкого повышения доли гидрокарбонатных ионов (СО<sub>3</sub><sup>2-</sup> и НСО<sub>3</sub><sup>-</sup>). Среди катионов доминирует Na<sup>+</sup>. Химизм засоления светлогумусовой засоленной почвы в зависимости от анионов является содово-хлоридным и хлоридно-содовым, катионов – натриевым.

Известно, что потенциальное (или пассивное) плодородие характеризуется не только рассмотренными относительно стабильными физическими, физико-химическими и химическими свойствами почв, но и содержанием и запасами химических элементов. Геохимическая специализация изученных приозерных почв в кратком виде была

представлена нами ранее [25]. С агрохимических позиций наибольший интерес представляет рассмотрение количественного уровня важнейших элементов-биофилов. В данном сообщении показано общее (валовое) содержание макроэлементов N, P, K, Ca, Mg, S, Na, Fe, из микроэлементов – Mn, Zn, Cu, Co, Ni (табл. 2).

Распределение азота, являющегося важнейшим питательным веществом для растений, в исследованных почвах было неравномерным. Незначительное его количество обнаружено в разрезе Б-3 и еще меньшее – в других почвах. Отмечено закономерное снижение содержания N с глубиной. Высокая концентрация этого элемента выявлена только в солончаковом слое (0–5 см) разреза Б-1, что объясняется биогенной активностью алкафильной щелочнолюбивой микрофлоры [10]. В целом для азота характерна сильно выраженная неоднородная степень рассеивания в почвах и его неравномерный характер распределения по почвенному профилю. Количество валового фосфора существенно варьировало в приозерных почвах оз. Бабье ( $V = 54\%$ ). Максимальные показатели выявлены в верхних горизонтах разрезов Б-1 и Б-2, в остальных же они заметно меньше и меняются в пределах 160–289 мг/кг. Содержание общего калия и натрия во всех изученных почвах достаточно равномерное ( $V = 10\%$ ), отмечено незначительное количество этих элементов в слое 0–5 см солончака квазиглеевого.

Установлена очень высокая вариабельность содержания щелочноземельных элементов (Ca и Mg) в исследованных приозерных почвах ( $V = 80–82\%$ ), что преимущественно связано с различными процессами окарбоначивания в почвенном профиле. Содержание Ca существенно различается. В разрезе Б-3 количество его минимальное (7 110–13 600 мг/кг), тогда как в горизонтах  $Sq^{\sim}$  и  $2CQ^{\sim}$  солончака квазиглеевого и в слое 0–15 см гумусово-квазиглеевой засоленной почвы оно значительно больше (50 600–71 630 мг/кг). Уровень накопления и характер распределения Mg аналогичен Ca.

Общего Fe в почвах содержится от 12 720 до 23 440 мг/кг, а диапазон варьирования содержания элемента, согласно грациям по степени рассеивания, заметно меньше, чем Ca и Mg, но все же значительный ( $V = 24\%$ ). Валовое количество S в почвах широко варьирует в пределах от 212 до 904 мг/кг ( $V = 56–89\%$ ), что обусловлено уровнем и химизмом засоления. В солончаковом горизонте разреза Б-1 отмечена максимальная концентрация этого элемента – 2250 мг/кг (табл. 2).

Распределение биогенных микроэлементов в почвах прибрежных понижений оз. Бабье и их горизонтах дифференцированное и зависит от гранулометрического и минералогического составов,

обуславливающих их геохимическую специализацию. По степени вариабельности (рассеивания) для Mn, Zn и Ni оно неоднородное, а для Cu и Co – незначительное (табл. 3).

Выявлено, что солончаковый слой (0–5 см) разреза Б-1 отличался значительным своеобразием в элементном составе, т.к. было отмечено очень высокое содержание N, Ca, Mg и S и повышенное – P, Na, Fe и Mn. Возможно, что специфика данного химического состава (учитывая и другие элементы) в определенной степени оказывала влияние на лечебные свойства данных солей и озерных грязей.

Важное значение для агрохимической оценки почвенного продукционного потенциала имеет сравнительная характеристика содержания биогенных элементов в изученных почвах с эталоном почвенного плодородия – черноземом [31] и преобладающей зональной почвой – каштановой мучнисто-карбонатной почвой Забайкалья [32].

Полученные результаты свидетельствовали, что в горизонтах  $Cs^{\sim}$  разреза Б-1 (5–20 см),  $AJ$  разреза Б-2 (0–15 см) и  $AJ$  разреза Б-3 (0–33 см) содержится меньше, чем в черноземе, количество Fe, Mn, Zn, Cu и Co и особенно N, P, S. По сравнению с каштановой почвой Забайкалья, являющейся низко обеспеченной большинством важнейших макро- и микроэлементов [32], в них выявлено низкое содержание P, K, Na, Fe, Mn, Zn и Co, но относительно более высокое – N и S.

Очень важными при изучении продукционного потенциала почв являются сведения о подвижной форме элементов питания, т.к. в ее состав входят наиболее доступные для корневого питания растений соединения.

Согласно разработанным грациям обеспеченности почв питательными элементами [27, 33] установлено: содержание легкодоступных соединений N (нитратного и аммиачного), Ca и особенно P, K, Na, Mg и Mn было повышенным только в солончаковом слое (0–5 см) разреза Б-1. В целом в профилях и во всех остальных горизонтах исследованных почв выявлены незначительные изменения и невысокое содержание аммиачного азота, очень низкое – нитратного азота и подвижного фосфора и среднее – обменного калия (табл. 4).

Содержание и распределение по профилю извлекаемых ацетатно-аммонийным буфером pH 4.8 соединений Na, Ca, Mg, Fe и Ni варьировали в зависимости от свойств и вещественного состава почв: pH почвенной среды,  $CO_2$  карбонатов, влагообеспеченности почвы, степени и химизма засоления, общего содержания элемента, генезиса и состава гранулометрических фракций. Научно и официально разработанных граций

**Таблица 2.** Валовое содержание элементов минерального питания в приозерных почвах оз. Бабье, мг/кг

Горизонт	Глубина, см	N	P	K	Na	Ca	Mg	Fe	S	Mn	Zn	Cu	Co	Ni
Разрез Б-1. Солончак квазиглеевый														
Sq~	0–5	9100	588	18 300	19 900	50 600	35 520	19 700	2250	477	52.8	19.2	9.6	21.9
Cs~	5–20	800	190	26 070	21 700	19 800	7100	13 200	584	234	19.6	10.6	5.2	9.5
CQs~	20–30	800	268	24 800	18 100	20 200	8300	13 900	319	321	23.1	9.8	5.9	10.0
2CQ~	30–80	500	284	23 600	17 300	69 700	16 700	12 720	807	320	25.8	12.3	4.9	9.4
Разрез Б-2. Гумусово-квазиглеевая засоленная почва														
AJs	0–15	2000	587	21 200	15 500	71 630	9700	22 500	904	673	37.1	16.3	8.5	15.6
ACs	15–34	500	173	25 300	18 100	15 200	8200	13 600	212	229	20.0	9.4	5.5	8.7
QCs	34–65	500	160	23 300	16 600	30 000	21 200	14 400	212	282	26.4	13.6	6.4	13.5
Разрез Б-3. Светлогумусовая засоленная почва														
AJ	0–33	2400	289	24 400	16 900	7110	2790	19 200	278	377	26.5	11.1	7.8	12.8
ACs	33–44	1600	224	24 300	17 800	7700	4600	20 700	437	302	33.1	12.5	7.7	17.7
Cs	44–60	1000	208	23 800	19 600	13 600	6800	23 440	890	340	38.7	13.3	9.0	22.2
Кларк в почвах мира [29, 30]	–	–	800	15 000	5000	15 000	5000	40 000	700	488	70	38.9	11.3	29.0
Чернозем [31]		4250	970	18 400	–	11 800	6400	29 300	1600	750	48	30	11	–
Каштановые почвы (0–20 см) [32]		780	690	31 200	30 900	14 500	5780	24 100	220	600	44	10.0	8.0	–

**Таблица 3.** Вариационно-статистические показатели валового содержания элементов минерального питания в приозерных почвах оз. Бабье

Элемент	$M \pm m$	Min	Max	V, %
Азот	1920 ± 830	500	9100	>100 (136)
Азот*	1220 ± 240	500	2400	58
Фосфор	297 ± 50	160	588	54
Калий	23 500 ± 700	18 300	26 070	10
Натрий	18 200 ± 580	15 500	21 700	10
Кальций	30 600 ± 7 800	7 110	71 600	80
Магний	12 100 ± 3 100	2 790	35 500	82
Железо	17 400 ± 1 320	12 700	23 400	24
Сера	690 ± 194	212	2 250	89
Сера*	516 ± 96	212	904	56
Марганец	356 ± 42	229	673	37
Цинк	30.3 ± 3.3	19.6	52.8	34
Медь	12.8 ± 1.0	9.4	19.2	24
Кобальт	7.1 ± 0.5	4.9	9.6	24
Никель	14.1 ± 1.6	8.7	22.2	36

\* Без учета содержания элементов в горизонте Sq~ (0–5 см) солончака квазиглеевого (разрез Б-1).

**Таблица 4.** Содержание подвижной формы элементов минерального питания в приозерных почвах оз. Бабье, мг/кг

Горизонт	Глубина, см	N		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Na	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	Co	Ni
		N-NO <sub>3</sub>	N-NH <sub>4</sub>	по Мачигину										
<b>Разрез Б-1. Солончак квазиглеевый</b>														
Sq <sup>~</sup>	0–5	3.3	21.0	56.6	747	15 200	36 700	18 400	46.4	219	3.02	0.28	0.60	0.52
Cs <sup>~</sup>	5–20	0.9	7.5	1.8	154	3 220	10 400	4 100	90.7	75.8	3.10	0.34	0.47	0.44
CQs <sup>~</sup>	20–30	0.4	8.0	1.4	210	3 480	32 100	5 880	90.8	16.5	2.32	0.49	0.70	0.60
2CQ <sup>~</sup>	30–80	0.5	8.0	9.3	178	2 150	43 100	6 560	116	99.4	2.10	0.50	0.49	0.36
<b>Разрез Б-2. Гумусово-квазиглеевая засоленная почва</b>														
AJs	0–15	1.8	16.0	1.8	195	316	7 060	2 930	14.5	85.5	1.35	0.07	0.16	0.10
ACs	15–34	0.5	9.5	12.0	157	1 200	4 440	3 590	35.0	55.2	2.00	0.12	0.33	0.33
QCs	34–65	0.4	9.0	6.6	169	1 240	15 600	10 700	127	99.1	0.12	0.11	0.90	0.83
<b>Разрез Б-3. Светлогумусовая засоленная почва</b>														
AJ	0–33	2.2	14.0	2.2	121	99	936	266	0.6	4.4	0.80	0.01	Следы	0.05
ACs	33–44	2.4	9.5	6.6	121	1 750	1 230	508	2.7	2.2	0.69	0.04		0.13
Cs	44–60	1.4	8.5	6.6	137	3 270	2 520	1 110	4.7	5.5	1.48	0.16		0.21
ПДК [33]										100	23	3.0	5.0	4.0
Каштановые почвы (0–20 см) [32]		0.9–2.2	4.0–9.8	23.8	128–177	–	–	–	–	10.6–21.1	0.34–0.92	0.1–0.21	0.06–0.08	16–18

**Таблица 5.** Обеспеченность почв подвижной формой элементов питания

Элемент	Градации обеспеченности культур		
	Разрез Б-1, гор. Cs <sup>~</sup> (5–20 см)	Разрез Б-2, гор. AJs (0–15 см)	Разрез Б-3, гор. AJ (0–33 см)
Азот нитратный	Очень низкая	Очень низкая	Очень низкая
Фосфор	Очень низкая	Очень низкая	Очень низкая
Калий	Средняя	Средняя	Средняя
Марганец	Высокая	Высокая	Низкая
Цинк	Средняя	Низкая	Низкая
Медь	Средняя	Очень низкая	Очень низкая
Кобальт	Высокая	Средняя	Очень низкая

по полученным по данной методике показателям не обнаружено, но в целом можно считать, что уровень накопления подвижных форм Na, Ca и Mg достаточно высокий, а Fe и Ni – заметно меньше, особенно в светлогумусовой засоленной почве.

Распределение доступных для растений соединений Mn и Co находится на достаточно высоком уровне обеспеченности по всему профилю в разрезах Б-1 и Б-2 и низком – в разрезе Б-3. Для Zn и Cu характерна средняя степень их содержания во всех горизонтах солончака квазиглеевого и очень

низкая и низкая – в гумусово-квазиглеевой засоленной и светлогумусовой засоленной почвах.

Анализ полученных данных в верхних горизонтах почв прибрежных понижений оз. Бабье показал, что все они характеризуются очень низким содержанием нитратного азота, подвижного фосфора и средним – обменного калия (табл. 5).

Уровень накопления биогенных микроэлементов в изученных почвах различен: средне-высокий – в верхнем слое (5–20 см) в разрезе Б-1, высокий для Mn, средний для Co и низкий для Zn

и Cu – в разрезе Б-2 и низкий для Mn и Zn и очень низкий для Cu и Co – в разрезе Б-3. Также выявлено, что подвижная форма Mn в некоторых горизонтах солончака квазиглеевого и гумусово-квазиглеевой засоленной почвы содержится в близкой к ПДК величине (100 мг/кг), а в поверхностном слое разреза Б-1 даже превышает ее в 2.2 раза. Содержание соединений Zn, Cu, Co и Ni, извлекаемых ацетатно-аммонийным буфером pH 4.8, значительно ниже ПДК, разработанных для этих микроэлементов, особенно в светлогумусовой засоленной почве [34].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Почвенное разнообразие прибрежных понижений пульсирующих высокоминерализованных хлоридных озер Улдза-Торейского бессточного бассейна (на примере оз. Бабье) представлено 3-мя основными типами почв, формирующимися на различных ландшафтных позициях: на супераквально-субаквальных – солончаки квазиглеевые, на супераквальных – гумусово-квазиглеевые засоленные почвы, на элювиально-супераквальных – светлогумусовые засоленные почвы.

Солончаки квазиглеевые формируются под существенным влиянием высокоминерализованных хлоридных озерных вод. Для них свойственна резкая смена гранулометрического состава, сильнощелочные показатели  $pH_{H_2O}$ , насыщенность свободными карбонатами, незначительное содержание гумуса (кроме солонцового слоя, где преимущественно учитывается  $C_{орг}$ ), резкое преобладание в составе обменных катионов  $Na^+$  и  $Mg^{2+}$ . Степень засоления очень высокая, среди легкорастворимых солей преобладают токсичные соединения. Тип засоления – хлоридно-натриевый. Общее (валовое) содержание N, P, Mn, Zn, Cu, Co и Ni в солончаках квазиглеевых (без учета гор.  $Sq^{\sim}$ ) находится на низком, Fe и S – пониженном, остальных элементов – на высоком уровне по сравнению с кларком в почвах мира и эталоном почвенного плодородия – черноземом. Значительным своеобразием в элементном составе отличается солончаковый слой (0–5 см), т.к. ему свойственно очень высокое количество N, Ca, Mg и S. Содержание доступных для растений соединений питательных веществ свидетельствует об очень низком содержании нитратного азота и подвижного фосфора, среднем – обменного калия и достаточно высоком – подвижной формы других биогенных элементов.

Гумусово-квазиглеевая засоленная почва в аридной циклической фазе функционирует в полугидроморфном режиме. Она характеризуется супесчаным гранулометрическим составом в верхней части профиля, щелочной и сильнощелочной

реакцией среды, более низкой степенью окисленности профиля, малогумусностью, относительно благоприятным составом обменных катионов: >80% приходится на  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$ . Почва является засоленной, концентрация легкорастворимых ионов повышается с глубиной. Тип засоления – содово-хлоридный и хлоридно-содовый, в зависимости от катионов – натриевый. Общее содержание биогенных элементов в данной почве при сравнении с кларком в почвах мира и курским черноземом относительно близко с солончаком квазиглеевым. Содержание доступных для растений соединений питательных веществ информирует об их очень низкой обеспеченности нитратным азотом, фосфором и медью, низкой – цинком, средней – калием и кобальтом и относительно высокой – другими элементами.

Светлогумусовая засоленная почва формируется на более высокой ландшафтной позиции без признаков влияния грунтовых вод. Гумусовый горизонт (0–33 см) обладает супесчаным гранулометрическим составом, слабощелочным pH, низким содержанием свободных карбонатов, преобладанием в составе обменных катионов  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$ , незасоленностью. В более глубоких слоях профиля происходит подщелачивание почвенной среды, возрастание суммы обменных оснований с резким увеличением обменного натрия, усиливается степень засоления. Уровень депонирования общего N, валовых P, S и микроэлементов значительно меньше, Ca и Fe – пониженном, а K и Na – превышает их среднее содержание в почвах мира и курском черноземе. По содержанию подвижных форм питательных веществ в светлогумусовой засоленной почве все исследованные элементы находятся на очень низком и низком уровне обеспеченности, кроме обменного калия.

Исследованные почвы прибрежных понижений оз. Бабье характеризуются неблагоприятными физическими и физико-химическими свойствами и мелиоративной ситуацией из-за избыточной засоленности, низкого содержания большинства важнейших элементов питания, в том числе доступных для растений (подвижных) форм азота, фосфора, а для гумусово-квазиглеевой засоленной и светлогумусовой засоленной почв – еще и биогенных микроэлементов. Поэтому они обладают крайне незначительным уровнем как потенциального, так и эффективного плодородия.

По категориям использования земель в аграрном производстве исследованные почвы, в связи с их низким уровнем плодородия, засоленностью и слабой экологической устойчивостью, следует отнести к малопригодным или непригодным для использования. Можно рекомендовать только нормированный эпизодический выпас домашнего

скота. Учитывая экологическую уникальность и лечебную ценность озера и его приозерных экосистем, более эффективным природоохранным мероприятием следует считать их полное выведение из сельскохозяйственного оборота и использование в виде особо охраняемых природных компонентов в составе воспроизводственных участков, заказников, заповедников, территорий лечебно-бальнеологических курортов и других внекурортных здравниц.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Склярёв Е.В., Склярёва О.А., Меньшагин Ю.В., Данилова М.А.* Минерализованные озера Забайкалья и Северо-Восточной Монголии: особенности распространения и рудогенерирующий потенциал // Географ. и природ. ресурсы. 2011. № 4. С. 29–39.
2. *Borzenko S.V., Shvartsev S.L.* Chemical composition of salt lakes in East Transbaikalia (Russia) // *Geochemistry*. 2019. V. 103. P. 72–84.
3. *Kashnitskaya M.A., Bolgov M.V.* Closed Torey lakes: is it possible to predict changes in hydrological regime? // *Rus. Meteorol. Hydrolog.* 2021. V. 46. P. 341–344.
4. *Борзенко С.В.* Основные условия формирования химического состава вод соленых и солоноватых озер Восточного Забайкалья // *Геохимия*. 2020. Т. 65. № 12. С. 1212–1230.
5. *Горошко О.А.* Влияние многолетних климатических циклов на орнитокомплексы Даурии // *Эволюция биогеохимических систем (факторы, процессы, закономерности) и проблемы природопользования*. Чита, 2011. С. 140–143.
6. *Баженов Ю.А.* Население мелких млекопитающих окрестностей Торейских озер (юго-восточное Забайкалье) в период сухой климатической фазы: динамика и связь с осадками // *Сиб. экол. журн.* 2019. Т. 26. № 1. С. 29–41.
7. *Мордкович В.Г., Любеченский И.И.* Роль крупных членистоногих (Arthropoda: aranei, inse) в развитии галоморфных почв на юге Сибири // *Почвоведение*. 2017. № 5. С. 698–710.
8. *Афони́на Е.Ю., Ташлыкова Н.А.* Планктон минеральных озер Юго-Восточного Забайкалья: трансформация и факторы среды // *Сиб. экол. журн.* 2019. № 2. С. 192–209.
9. *Bazarova B.B., Tashlykova N.A., Afonina E.Y., Kuklin A.P., Matafonov P.V., Tsybekmitova G.T., Gorchacheva E.P., Itigilova M.T., Afonin A.V., Butenko M.N.* Long-term fluctuations of the aquatic ecosystems in the Onon-Torey plain // *Shengtai Xuebao*. 2019. V. 39. № 2. P. 157–165.
10. *Абидуева Е.Ю., Сыренжапова А.С., Намсараев Б.Б.* Функционирование микробных сообществ в содово-соленых озерах Онон-Керуленской группы (Забайкалье и Северо-Восточная Монголия) // *Сиб. экол. журн.* 2006. Т. 13. № 6. С. 707–716.
11. *Namsaraev Z.B., Gorlenko V.M., Zaitseva S.V., Kozyreva L.P., Namsaraev B.B.* Microbial processes and factors controlling their activities in alkaline lakes of the Mongolian plateau // *Chin. J. Oceanol. Limnol.* 2015. V. 33. № 6. P. 1391–1401.
12. *Баженова О.И., Черкашина А.А.* Голоценовый морфолитогенез в озерных котловинах юго-восточного Забайкалья // *Геоморфология*. 2018. № 2. С. 4–19.
13. *Давыдова Н.Д.* Состояние озер Онон-Аргунского междуречья в условиях меняющегося климата // *Географ. и природ. ресурсы*. 2020. № 5. С. 147–153. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2020-5(147-153)
14. *Хадеева Е.Р.* Галогенез почв Забайкалья и Предбайкалья: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Иркутск, 2021. 20 с.
15. *Давыдова Н.Д.* Изменения в компонентах степных геосистем юго-восточного Забайкалья в условиях потепления климата // *Арид. экосист.* 2022. Т. 28. № 1(90). С. 3–10. DOI: 10.24412/1993-3916-2022-1-3-10
16. *Воскресенский С.С., Постолёнок Г.А., Симонов Ю.Г.* Генезис и строение рельефа юго-восточного Забайкалья // *Геоморфологические исследования*. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1965. С. 11–122.
17. *Парфенов Л.М., Попеко Л.И., Томуртоого О.* Проблемы тектоники Монголо-Охотского орогенного пояса // *Тихоокеан. геол.* 1999. Т. 18. № 5. С. 24–43.
18. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Лист М-50 – Борзя. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2010. 553 с. + 6 вкл.
19. *Лавренко Е.М.* Провинциальное разделение Центральноазиатской подобласти Степной области Евразии // *Бот. журн.* 1970. Т. 55. № 12. С. 511–526.
20. *Дуленова Б.И.* Растительность Даурского озерно-степного заповедника // *Уч. зап. Забайкал. Гос. гуманитар.-педагог. ун-та им. Н.Г. Чернышевского*. 2010. Т. 1. С. 35–39.
21. *Ткачук Т.Е., Жукова О.В.* Результаты мониторинга растительности на стационарном геоботаническом профиле в Даурском заповеднике // *Природоохран. сотруд-во: Россия, Монголия, Китай*. 2010. № 1. С. 290–294.

22. Tkachuk T.E., Pazdnikova N.M., Kozlova V.N., Saraeva L.I., Goryunova S.V. Dynamics of riparian vegetation of steppe lakes in the Dauria // Proceed. of the Inter. Conf. of China–Mongolia–Russia Dauria Inter. Protect. Area. Ulaanbaatar: Wildlife Conservation Society, 2014. P. 52–56.
23. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
24. Полевой определитель почв. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
25. Убугунова В.И., Убугунов Л.Л., Жамбалова А.Д., Аюшина Т.А., Убугунов В.Л. Почвы приозерных понижений пульсирующих хлоридных озер области внутреннего стока Центральной Азии // Почвоведение. 2023. № 12. С. 1580–1595.
26. Воробьева Л.А. Теория и методы химического анализа почв. М.: ГЕОС, 2006. 400 с.
27. Практикум по агрохимии. Учеб. пособ. / Под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
28. Практикум по агрохимии. Учеб. пособ. / Под ред. В.А. Романенкова. М.: Изд-во МГУ, 2021. 144 с.
29. Kabata-Pendias A. Trace elements in soils and plants. 4th ed. Taylor and Francis Group, LLC, 2011. 505 p.
30. Требования к геохимической основе государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000 (новая редакция). М.: ИМГРЭ, 2005. 40 с.
31. Ильин В.Б. Почвообразование и биогенная аккумуляция химических элементов // Проблемы почвоведения. М.: Наука, 1982. С. 49–52.
32. Убугунов Л.Л. Оптимизация минерального питания капусты. Улан-Удэ: Бурят. кн. изд-во, 1987. 128 с.
33. Маладаева М.Р., Убугунов Л.Л., Абашева Н.Е. Агрохимия. Учеб.-метод. изд-е. Улан-Удэ: Бурят. ГСХА им. В.Р. Филиппова, 2002. 142 с.
34. ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормативы / Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. М., 2006. 14 с.

## Agrochemical Assessment of Productive Potential of Soils of Coastal Depressions of Pulsating Highly Mineralized Chloride Lakes of the Uldza–Torey Drainless Closed Basin

L. L. Ubugunov<sup>a, b, #</sup>, T. A. Ayushina<sup>a</sup>, V. I. Ubugunova<sup>a</sup>, A. D. Zhambalova<sup>a</sup>,  
V. L. Ubugunov<sup>a</sup>, O. V. Vishnyakova<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of General and Experimental Biology SB RAS,  
ul. Sakhyanovoi 6, Ulan-Ude 670047, Russia*

<sup>b</sup>*V.R. Filippov Buryat State Agricultural Academy,  
ul. Pushkina 8, Ulan-Ude 670010, Russia*

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

The soil diversity of coastal depressions of pulsating highly mineralized chloride lakes of the Uldza–Torey closed basin (on the example of the Lake Babie) within the Southeastern Transbaikalia area was studied. It has been established that 3 main soil types dominate: quasigley solonchaks, saline humus-quasigley soils and light humus saline soils. The soils under study, especially the quasigley solonchaks, are characterized by unfavorable physicochemical and agrochemical properties and a high degree of salinity in most horizons with the excessive content of Na<sup>+</sup> and Cl<sup>–</sup> toxic ions. Very high concentrations of N, Ca, Mg, S, and Na<sup>+</sup> and Cl<sup>–</sup> ions were revealed in the upper saline layer (0–5 cm) of the quasigley solonchaks. A low content of the most important nutritional elements, including nitrogen and phosphorus available for plants was defined mainly in soils studied, so as biogenic microelements in humus-quasigley saline and light humus saline soils. Therefore, these soils have an extremely low level of both potential and effective fertility based on the agrochemical assessment of their production ability. When considering the ecological uniqueness and medicinal value of the lake and its lakeside ecosystems, it is recommended to exclude these soils and land resources from agricultural practice. They must be used in the form of specially protected natural landscape components as a part of reproduction areas, nature reserves, territories of medical and balneological resorts and other health care facilities.

*Keywords:* salt lakes, coastal depressions, soils, agrochemical properties, macro- and microelements, fertility assessment, Transbaikalia area.

УДК 631.816.1:631.85:633.1(571.1)

## ОПТИМАЛЬНЫЕ ДОЗЫ ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ ДЛЯ ЗЕРНОВЫХ АГРОЦЕНОЗОВ ПРИОБЬЯ

© 2024 г. С. А. Колбин<sup>1</sup>, А. А. Данилова<sup>1,\*</sup>, А. Г. Рахленко<sup>1</sup><sup>1</sup>Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий РАН  
630501 Новосибирская обл., р.п. Краснообск, ул. Центральная, 26, Россия

\*E-mail: Danilova7alb@yandex.ru

Необходимость интенсификации аграрного сектора для обеспечения продовольственной безопасности растущего населения планеты на фоне истощения природных источников фосфоритного сырья приводит к увеличению затрат сельхозпроизводителей на фосфорные удобрения (ФУ), что повышает актуальность проблемы оптимизации доз применения последних. На основе обобщения результатов многолетних полевых опытов сравнили экономическую и экологическую обоснованность разных подходов к расчету доз ФУ под зерновые культуры в Приобье. Исследование провели в 2006–2017 гг. в многолетних опытах СФНЦА РАН на черноземе выщелоченном среднесуглинистом среднегумусном в Центральной лесостепи Приобья (54°53'13.5" с.ш. и 82°59'36.7" в.д.). Расчеты выполнены по результатам наблюдений в 3-х севооборотах: 3-польном зернопаровом (пар–пшеница–пшеница), в 4-польном зернопаровом (пар–пшеница–пшеница–ячмень), в 4-польном зернопаровом (пар–пшеница–пшеница–пшеница). Длительность опытов равна соответственно 18, 23, 38 лет. Опыты проведены на фоне внесения азотных удобрений при полной схеме защиты растений от вредных организмов. Установлена высокая агрономическая эффективность внесения ФУ: прибавка урожайности зерна при применении P15–P30 в среднем составила 0.5–1.2 т/га. Вынос фосфора урожаем зерна (отчуждение его с поля) в контрольных вариантах составлял ≈20 кг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/га севооборотной площади, в вариантах с внесением удобрений достигал 30 кг/га. Вынос его надземной биомассой был в 1.6 раза больше и достигал 48 кг/га. Баланс фосфора в почве в вариантах опытов без внесения ФУ был дефицитным (–15–27 кг/га), при внесении P15 дефицит его составил –11 кг/га, при дозе P30 сальдо баланса было положительным, т.е. поступление фосфора было избыточным. Свидетельством избыточности доз ФУ >P30 для зерновых агроценозов в лесостепи Приобья считали 2 показателя: накопление в почве подвижного минерального фосфора и увеличение фракции ферментативно доступного фосфора, эти пулы могут стать источником потерь фосфора из агроценоза. Сделан вывод, что для чернозема выщелоченного Приобья расчет доз фосфорных удобрений на основе величины отчуждения фосфора урожаем зерна является более обоснованным с экономических и экологических позиций в сравнении с расчетом на основе величины выноса элемента всей надземной (зерно + солома) биомассой растений.

**Ключевые слова:** фосфорные удобрения, агроценоз, севооборот, зерновые культуры, отчуждение фосфора урожаем зерна, вынос фосфора надземной биомассой, баланс фосфора в почве.

**DOI:** 10.31857/S0002188124080032, **EDN:** CEOYUN

### ВВЕДЕНИЕ

Известно, что основным источником фосфора для сельскохозяйственного производства являются полезные ископаемые (фосфоритные руды), 60% запасов которых может быть исчерпано к 2100 г. При этом мировой спрос на сельскохозяйственную продукцию с 2005 по 2050 г. может увеличиться на 100–110% [1–3]. Для поддержания глобальной продовольственной безопасности потребуется дальнейшая интенсификация аграрного сектора экономики. Соответственно возрастет потребность в фосфорных удобрениях, вследствие

чего станет выраженной тенденция к увеличению затрат на удобрения [4]. В этих условиях для поддержания прибыльности сельского хозяйства крайне важно повысить эффективность использования фосфорных удобрений [5].

В мире базовым критерием при применении фосфорных, как и других, удобрений является высокая эффективность их использования растениями. То есть стоимость удобрений должна окупаться прибавкой урожая. В этом контексте последние годы идет интенсивный поиск определения оптимальных доз фосфорных удобрений

в зависимости от вида культуры, особенностей почвенно-климатических и агротехнических условий [6]. При этом признают, что экономически оптимальные дозы удобрений позволят смягчить остроту ряда экологических проблем [3, 7].

В РФ исторически сложился иной подход, основанный на концепции расширенного воспроизводства почвенного плодородия, — дозы удобрений должны не только обеспечить урожайность, но и способствовать улучшению агрохимических свойств почвы [8].

Дискуссионные вопросы, связанные с оптимизацией доз фосфорных удобрений, тесно связаны с подходами к оценке баланса фосфора в земледелии. Существует концепция, что баланс фосфора должен быть положительным с превышением поступления его над выносом не менее, чем на 50%. Утверждают, что при низком содержании подвижного фосфора в большинстве почв РФ и низкой усвояемости фосфора удобрений для поддержания почвенного плодородия поступление этого элемента должно превышать вынос урожаем не менее чем в 2.0–2.5 раза [9]. Недостаточная экспериментальная обоснованность этого утверждения, по мнению [10], связана с тем, что принятые в 1988 г. нормативы окупаемости минеральных удобрений на зерновых культурах, составляющие 3–5 кг зерна за 1 кг д.в., были получены в краткосрочных полевых опытах, без учета последствий удобрений и при низком технологическом уровне их проведения.

В практическом плане расчет доз удобрений, необходимых для достижения положительного баланса фосфора в почве, предлагали проводить на основе учета планируемого урожая и желаемого изменения содержания подвижных форм элемента в почве (формула Постникова) [11]. В последующие годы данный подход фактически не использовали в земледельческой практике [9]. Однако и в настоящее время все еще продолжают исследования, посвященные данной тематике. Например, в работе [12] указано, что для повышения содержания элемента на 1 мг  $P_2O_5$ /кг почвы в зависимости от типа почвы необходимо вносить от 5 до 12 кг  $P_2O_5$ /га. Примерно такие же данные приведены в работе [13]. На основе этих рекомендаций авторы предлагают, что для перевода почв с низким и средним содержанием подвижного фосфора в более высокую категорию в течение 10–12 лет необходимо вносить дозы фосфорных удобрений, превышающие вынос элемента в 2 раза, что позволит ежегодно повышать содержание подвижного фосфора в почве на 3–4 мг/кг. Авторы данного сценария планируют, что в среднем в РФ доза внесения минеральных удобрений к 2030 г. должна составлять 150–160 кг д.в./га, т.е. увеличиться в 3 раза по сравнению с 2016 г. (49 кг д.в./га). Вне зоны внимания этих авторов остается экономическая и экологическая

обоснованность внесения таких высоких доз удобрений. Выход из данной ситуации, на наш взгляд, заключается в том, что определяющим фактором для обоснования доз удобрений должны признать увеличение продуктивности сельскохозяйственных культур.

В настоящее время существуют 3 основных подхода для расчета доз фосфорных удобрений: 1 — дозы, обеспечивающие положительный баланс фосфора в почве (дозы фосфорных удобрений, обеспечивающие превышение поступления его над выносом не менее чем на 50%), 2 — дозы, обеспечивающие вынос фосфора зерном и соответствующим количеством побочной продукции (соломой), 3 — дозы, компенсирующие вынос фосфора урожаем зерна (хозяйственный вынос). Первый подход наряду с повышением урожайности предусматривает повышение агрохимических показателей плодородия почвы. Последние 2 подхода направлены только на обеспечение потребности растений в доступных элементах питания (в данном случае фосфора). В практике расчета доз удобрений чаще всего используют методы расчета доз удобрений, основанные на 2-м подходе, т.е. на суммарном выносе элемента зерном и побочной продукцией культуры. Считается, что при данном подходе обеспечивается вынос элемента надземной биомассой растений, необходимый для достижения планируемой урожайности культуры. Этот метод не учитывает некоторые важные моменты, связанные со спецификой использования растениями фосфора удобрений: 1 — величину выноса элемента подземной биомассой растений, 2 — вариацию коэффициента использования элемента как из почвы, так и удобрений, в зависимости от условий увлажнения в течение вегетационного периода, 3 — последствие фосфорных удобрений. Известно, что коэффициент использования фосфорных удобрений (КИУ) составляет в среднем 20% в год использования и 10% — во 2-й и 3-й год последствия. Третий подход, как правило, используют в исследованиях, посвященных расчетам баланса фосфора в почве. Данный подход в долгосрочной перспективе, например, при расчетах дозы удобрений за ротацию севооборота, позволяет обеспечивать планируемую урожайность культур севооборота при неизменных показателях плодородия почв.

В связи с этим цель работы — на основе обобщения результатов многолетних полевых опытов сравнить экономическую и экологическую обоснованность разных подходов к расчету доз фосфорных удобрений под зерновые культуры на черноземе выщелоченном в лесостепи Новосибирского Приобья.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в многолетних опытах в “ОС Элитная” СФНЦА РАН в левобережной

части Новосибирского Приобья (54°53'13.5" с.ш. и 82°59'36.7" в.д.). По гидротермическим ресурсам район проведения исследования – Центральная лесостепь Новосибирского Приобья – характеризуется как достаточно, но неустойчиво увлажненная территория. Среднегодовое количество осадков составляет 452 мм, сумма температур воздуха >10°C – ≈1800°C. По погодным условиям годы исследования были разными, но в целом за 12 лет наблюдений условия вегетационного периода соответствовали среднемноголетним нормам.

Анализ данных урожайности и выноса фосфора растениями в среднем за 8 лет исследования (за 2010–2017 гг.) проведен в следующих опытах [14]: 1 – в 3-польном зернопаровом севообороте (пар–пшеница–пшеница, длительность опыта 18 лет), 2 – в 4-польном зернопаровом севообороте (пар–пшеница–пшеница–ячмень) и посевах бессеменной пшеницы в течение 23 лет, 3 – в 4-польном зернопаровом севообороте (пар–пшеница–пшеница–пшеница в течение 38 лет).

Почва – чернозем выщелоченный среднемошной среднегумусный среднесуглинистый (Luvic Chernozem). Агрохимическая характеристика почвы: гумус в Апах – 6.0%, содержание общего азота – 0.33%, подвижного P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (по Чирикову) – 23, K<sub>2</sub>O – 18 мг/100 г.

В опытах применяли общепринятую для лесостепной зоны интенсивную технологию возделывания зерновых культур. Выращивали яровую пшеницу сорта Новосибирская 31 и яровой ячмень сорта Ача. Обработка почвы – вспашка на глубину 25–27 см. Азотное удобрение (N<sub>аа</sub>) вносили под предпосевную культивацию (КС 5.6 “Степняк”), фосфорное удобрение (АФ) – в паровое поле один раз за ротацию севооборота.

Урожайность зерновых культур определяли напрямую комбайном “Сампо-500”, солому измельчали и рассеивали по поверхности поля. Повторность в вариантах трехкратная. Статистическая обработка результатов выполнена методом

дисперсионного анализа с помощью пакета компьютерной программы “Снедекор” [15].

В почве содержание подвижного фосфора определяли по Чирикову (ГОСТ 26204-91) и по Карпинскому–Замятиной [16, 17], в растениях – вандомлибденовым методом по Пиневиц в модификации Куркаева [18]. Баланс фосфора в почве рассчитали как разность между суммами приходных и расходных статей его поступления по методике расчета хозяйственного баланса элементов питания [19]. Особенность предлагаемых в статье расчетов заключается в комплексном учете 4-х основных факторов: многолетние полевые опыты, на фонах исключено лимитирование культур по количеству азота, вынос элемента ранжировали по погодным условиям вегетационного периода, в опытах обеспечивали полную комплексную защиту растений от вредных организмов. Как было отмечено выше [10], ранее многие выводы об оптимальных дозах удобрений были сделаны без учета некоторых из этих факторов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Несмотря на высокое содержание подвижного фосфора в почве, определенного по методу Чирикова, в опытах была получена высокая агрономическая эффективность внесения фосфорных удобрений. Прибавка урожайности пшеницы после пара возрастала по мере увеличения лет использования почвы в севооборотах с 0.31 до 1.10 т/га (табл. 1).

За годы исследования размах изменений величины урожайности пшеницы достигал 3.3 раза, что было связано с изменчивостью условий увлажнения вегетационного периода. Например, за 12 лет исследования в 2012 г. наблюдали очень сильную засуху (ГТК<sub>июня–июля</sub> <0.3), 5 лет из них были засушливыми (ГТК<sub>июня–июля</sub> 0.3–1.0) и 6 лет – умеренно увлажненными (ГТК<sub>июня–июля</sub> >1.0), в зоне исследования встречаемость лет с такими условиями увлажнения составляет соответственно 8, 42 и 50% лет. В условиях очень сильной засухи урожайность была на 76%

**Таблица 1.** Агрономическая эффективность внесения фосфорных удобрений в посевах пшеницы после пара (среднее за 2006–2017 гг.), т/га

Севооборот (длительность опыта, лет)	Доза P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> *	Урожайность зерна, т/га			
		среднее	Lim	Прибавка	HCP <sub>05</sub>
Пар–пшеница–пшеница (18)	P0	3.71	1.17–5.83	–	0.29
	P15	4.02	1.56–5.92	0.31	
Пар–пшеница–пшеница–ячмень (23)	P0	3.18	1.12–4.45	–	0.22
	P30	3.75	1.58–4.86	0.57	
Пар–пшеница–пшеница–пшеница (38)	P0	3.10	1.26–4.27	–	0.22
	P30	4.00	1.86–4.79	1.10	

\* Доза P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, кг/га севооборотной площади. То же в табл. 2.

**Таблица 2.** Урожайность пшеницы после пара в годы с различными условиями увлажнения вегетационного периода (2006–2017 гг.), т/га

Условия увлажнения	Севооборот (длительность опыта, лет)						НСР <sub>05</sub>
	Пар–пшеница–пшеница (18)		Пар–пшеница–пшеница–ячмень (23)		Пар–пшеница–пшеница (38)		
	P0	P15	P0	P30	P0	P30	
Очень сильная засуха	1.17	1.56	1.12	1.58	1.26	1.86	0.21
Засушливые	3.87	4.01	2.59	3.33	2.87	4.04	0.27
Умеренно увлажненные	3.99	4.44	4.02	4.46	3.59	4.31	0.29

**Таблица 3.** Влияние условий увлажнения вегетационного периода на урожайность зерновых культур (2006–2017 гг.), т з.е./га севооборотной площади

Условия увлажнения	Севооборот (длительность опыта, лет)					
	пар–пшеница–пшеница (18)		пар–пшеница–пшеница–ячмень (23)		пар–пшеница–пшеница–пшеница (38)	
	N0P0	N40P15	N0P0	N40P30	N0P0	N40P30
Очень сильная засуха	0.69	0.93	0.76	1.06	0.57	0.84
Засушливые	2.22	2.52	1.60	2.41	1.67	2.76
Умеренно увлажненные	2.49	2.82	2.45	3.09	1.94	2.93

**Таблица 4.** Средняя урожайность в опыте (2006–2017 гг.)

Севооборот (длительность опыта, лет)	Доза удобрений*	Урожайность зерна, т/га	
		среднее	Прибавка
Пар–пшеница–пшеница (18)	N0P0	2.23	–
	N40P15	2.54	0.31
Пар–пшеница–пшеница–ячмень (23)	N0P0	1.96	–
	N40P30	2.64	0.68
Пар–пшеница–пшеница–пшеница (38)	N0P0	1.71	–
	N40P30	2.68	0.97

\* Доза д.в. удобрений, кг/га севооборотной площади. То же в табл. 5.

меньше, в засушливых – на 27% меньше, чем в умеренно увлажненные годы (табл. 2).

Из этих данных следует, что в настоящее время в отсутствие надежного прогноза погоды вегетационного периода фактически невозможно рассчитать планируемую урожайность для отдельно взятого года. Поэтому расчет данной величины вынуждены вести в зависимости от среднесезонных показателей увлажнения. Фактическим результатом расчетов является определение климатически обеспеченной урожайности культуры по имеющимся ресурсам влаги. И, следовательно, вполне логичным является расчет дозы фосфорных удобрений для климатически обеспеченной урожайности культур в севообороте в целом, используя как базовый показатель величину среднего отчуждения фосфора урожаем основной продукции культур севооборота. При этом расчет дозы удобрений должен обеспечивать восполнение отчуждения фосфора урожаем (хозяйственный вынос) в целом без учета действия и последствия фосфорных удобрений. Основанием этого является мнение исследователей, что действие фосфорных удобрений

в многолетнем цикле может достигать 100% при условии, что технология возделывания сельскохозяйственных культур исключает потери фосфора из почвы.

В нашем исследовании получены экспериментальные данные зависимости урожайности зерновых культур в севообороте от условий увлажнения вегетационного периода. Например, при очень сильной засухе урожайность была в 3.3 раза меньше, чем в умеренно увлажненные годы. Внесение азотно-фосфорных удобрений в среднем повышало урожайность культур в 1.3 раза (табл. 3).

В среднем за годы исследования урожайность зерновых культур в вариантах без внесения удобрений составляла ≈2 т/га севооборотной площади, при систематическом внесении азотно-фосфорных удобрений прибавка урожая составляла 0.31–0.97 т/га (табл. 4). Увеличение дозы фосфорных удобрений с P15 до P30 не способствовало дальнейшему повышению урожайности.

Проведенное исследование позволило оценить баланс фосфора в почве в изученных севооборотах. В зависимости от условий увлажнения отчуждение

**Таблица 5.** Влияние условий увлажнения вегетационного периода зерновых культур на отчуждение фосфора и его баланс в почве (2006–2017 гг.), кг/га севооборотной площади

Условия увлажнения	Севооборот (длительность опыта, лет)					
	Пар–пшеница–пшеница (18)		Пар–пшеница–пшеница–ячмень (23)		Пар–пшеница–пшеница (38)	
	N0P0	N40P15	N0P0	N40P30	N0P0	N40P30
Отчуждение P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> урожаем зерна						
Очень сильная засуха	6.9	9.4	7.4	11.2	5.7	8.5
Засушливые	24.7	28.1	17.0	25.5	18.7	30.6
Умеренно увлажненные	26.3	29.6	25.6	32.4	20.7	31.2
Баланс P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> в почве						
Очень сильная засуха	–6.9	5.6	–5.7	21.5	–7.4	18.8
Засушливые	–24.7	–13.1	–18.7	–0.6	–17.0	4.5
Умеренно увлажненные	–26.3	–14.6	–20.7	–1.2	–25.6	–2.4

**Таблица 6.** Среднегодовые величины выноса фосфора зерновыми культурами на 1 га севооборотной площади и баланс его в почве (2006–2017 гг.), кг/га

Севооборот (длительность опыта, лет)	Доза удобрений	Вынос P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , кг/га		Баланс фосфора в почве
		зерном (отчуждение)	надземной биомассой	
Пар–пшеница–пшеница (18)	N0P0	24	39	–22
	N40P15	27	45	–11
Пар–пшеница–пшеница–ячмень (23)	N0P0	19	31	–17
	N40P30	28	45	4
Пар–пшеница–пшеница–пшеница (38)	N0P0	17	28	–16
	N40P30	29	47	3

фосфора из почвы составляло в очень засушливые годы в контроле 6–7 кг/га, при внесении азотно-фосфорных удобрений – 11 кг/га, в умеренно увлажненные годы – 26 и 32 кг/га соответственно (табл. 5).

В среднем за год вынос фосфора урожаем зерна (отчуждение элемента) составлял в контрольных вариантах ≈20 кг P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/га севооборотной площади, в вариантах с внесением удобрений достигал 29 кг/га. Вынос его надземной биомассой был в 1.6 раза больше и достигал 47 кг/га (табл. 6).

Баланс фосфора в почве в вариантах без внесения фосфорных удобрений был дефицитным (–16...–22 кг/га), при внесении P15 дефицит его составлял –11 кг/га, при дозе P30 сальдо баланса было положительным, т.е. поступление фосфора было избыточным. Свидетельством избыточности доз фосфорных удобрений >P30 для зерновых агроценозов в лесостепи Приобья были 2 показателя. Во-первых, многолетнее ежегодное применение (17–36 лет) привело к накоплению в почве легкоподвижного минерального фосфора (табл. 7).

Во-вторых, при дозах >P30 обнаружено накопление ферментативно доступной фракции органических соединений фосфора [20]. Известно, что избыток подвижного фосфора в пахотном слое почвы

всегда создает условия для потерь элемента из агроценоза и, как следствие, может привести к загрязнению окружающей среды.

Анализ экономической эффективности применения минеральных удобрений в севооборотах показал, что при внесении фосфорных удобрений в запас прибавка урожая зерна 1-й пшеницы после пара (1-й год действия удобрений) не окупает дополнительных затрат на их внесение. Прибыль от внесения минеральных удобрений была получена в опытах со 2-й и 3-й культурой севооборота после пара, где проявлялось действие азотного и последствие фосфорного удобрения (табл. 8). В среднем в севообороте чистая прибыль при внесении азотного (N40) и фосфорного удобрения (P15) была больше, чем при внесении P30.

Таким образом, расчет дозы фосфорных удобрений с учетом повышения запасов подвижного элемента в почве является высокзатратным. Подобный подход уже был опробован в нашей стране [10]. Известно, что массовые мероприятия химизации земледелия в СССР не дали ожидаемых результатов. Например с 1970 по 1985 г., когда поставки минеральных удобрений возросли с 4 до 10 млн т/год, обеспеченность пашни удобрениями приблизилась к 100 кг д.в./га, но урожайность оставалась на уровне 13 ц/га. В последующие годы

**Таблица 7.** Влияние доз удобрений на содержание легкоподвижного фосфора в почве в заключительном поле севооборота (2017 г.), мг/кг

Севооборот (длительность опыта, лет)	Доза удобрений	Содержание легкоподвижного фосфора в почве (по Карпинскому), мг/кг
Пар–пшеница–пшеница (18)	N0P0	0.21
	N40P15	0.58 (среднее)
Пар–пшеница–пшеница–ячмень (23)	N0P0	0.37
	N40P30	1.89 (высокое)
Пар–пшеница–пшеница–пшеница (38)	N0P0	0.37
	N40P30	0.83 (повышенное)

**Таблица 8.** Экономическая эффективность технологии возделывания зерновых культур в севообороте и внесения минеральных удобрений (2006–2017 гг.)

Севооборот (длительность опыта, лет)	Доза удобрений	Стоимость продукции, руб./га	Производственные затраты, руб./га		Чистая прибыль, руб./га	Прибыль от удобрений, руб./га
			удобрения	всего		
1-я пшеница после пара (действие фосфорных удобрений)						
Пар–пшеница–пшеница (18)	P0	44 520	0	12 965	31 555	
	P15	48 240	4685	17 650	30 590	–965
Пар–пшеница–пшеница–ячмень (23)	P0	38 160	0	12 965	25 195	
	P30	45 000	11 896	24 862	20 138	–5056
Пар–пшеница–пшеница–пшеница (38)	P0	37 153	0	12 965	24 187	
	P30	48 000	11 896	24 862	23 138	–1049
2-я пшеница после пара (действие азотных, последствие фосфорных удобрений)						
Пар–пшеница–пшеница (18)	N0P0	35 657	0	10 273	25 384	
	N40P15	43 054	5716	15 988	27 065	1681
Пар–пшеница–пшеница–ячмень (23)	N0P0	25 737	0	10 273	15 464	
	N40P30	35 397	3919	14 192	21 205	5741
Пар–пшеница–пшеница–пшеница (38)	N0P0	24 935	0	10 273	14 662	
	N40P30	42 988	3919	14 192	28 796	14 133
3-я пшеница (ячмень) после пара						
Пар–пшеница–пшеница–ячмень (23)	N0P0	22 493	0	10 273	12 220	
	N40P30	34 638	3919	14 192	20 446	8226
Пар–пшеница–пшеница–пшеница (38)	N0P0	20 230	0	10 273	9957	
	N40P30	37 780	3919	14 192	23 588	13 631
Среднее за ротацию севооборота (на 1 га севооборотной площади)						
Пар–пшеница–пшеница (18)	N0P0	26 726	0	7746	18 980	
	N40P15	30 431	3467	11 213	19 218	239
Пар–пшеница–пшеница–ячмень (23)	N0P0	23 472	0	8378	15 094	
	N40P30	31 645	4934	13 311	18 334	3240
Пар–пшеница–пшеница–пшеница (38)	N0P0	20 579	0	8378	12 202	
	N40P30	32 192	4934	13 311	18 880	6679

Примечания. 1. Стоимость удобрений в ценах 2023 г.: АФ – 50 000, N<sub>аа</sub> – 15 000 руб./т. 2. Цена зерна яровой пшеницы – 12 000, ячменя – 9000 руб./т.

(2011–2015 гг.) при сокращении их внесения до 39 кг д.в./га урожайность возросла до 22 ц/га. Не учитывая данный негативный опыт, многие исследователи утверждают, что планы увеличения объема производства зерна в РФ до 145–150 млн т к 2030 г. можно осуществить только при систематическом повышении плодородия почв за счет комплексного агрохимического окультуривания полей (КАХОП), путем внесения ежегодно не менее 7.4 млн т д.в. минеральных удобрений [21]. Такой подход приводит к тому, что агрохимические показатели почвы повышаются, а урожайность не растет. При этом низкая окупаемость удобрений (среднемировая окупаемость 1 кг д.в. удобрений зерном составляет ≈10 кг, что в 2 раза больше, чем в РФ) означает не только упущенную выгоду, но и экологический ущерб [10].

Как показали наши данные, расчет доз удобрений на основе величины выноса элемента из почвы (зерно + солома) также не всегда оправдан с экономических и экологических позиций. Установлено, что по крайней мере в черноземах Западной Сибири возмещение отчуждения фосфора зерном в многолетнем цикле не только недостаточно для обеспечения климатически обеспеченной урожайности яровой пшеницы, но и предотвращает формирование подвижного пула фосфора – потенциального источника загрязнения окружающей среды.

Вывод об избыточности доз фосфора, превышающих отчуждение его из почвы (отчуждение только зерном), не противоречит результатам других исследователей. В частности, в многолетних опытах на черноземах Курганской обл. при дозах P15–20 изменение обеспеченности почвы подвижным фосфором не было обнаружено, но урожайность культуры достоверно повышалась по сравнению с контролем, тогда как увеличение дозы до P60 привело к повышению обеспеченности почвы фосфором с низкого до высокого, но прибавки урожая относительно фона P15–20 не было отмечено [22, 23]. Сходные результаты получили на черноземах Омской обл. Было установлено, что внесенный с удобрением фосфор остается в наиболее подвижных (1-й и 2-й) фракциях минеральных фосфатов почвы, что и обеспечивает длительное последствие фосфорных удобрений. При этом улучшение условий фосфорного питания растений не сопровождалось повышением содержания подвижного фосфора в почве [24].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для условий Приобья расчет доз фосфорных удобрений на основе величины отчуждения фосфора урожаем зерна является более обоснованным с экономических и экологических позиций в сравнении с расчетом на основе величины выноса элемента всей надземной биомассой растений. То есть в интенсивных технологиях возделывания зерновых культур доза фосфорного удобрения при

систематическом его применении должна соответствовать отчуждению элемента только зерном.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Van Vuuren D.P., Bouwman A.F., Beusen A.H.* Phosphorus demand for the 1970–2100 period: a scenario analysis of resource depletion // *Global Environ. Change.* 2010. V. 20(3). P. 428–439. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.04.004>
2. *Yu X., Keitel C., Dijkstra F.A.* Global analysis of phosphorus fertilizer use efficiency in cereal crops // *Global Food Secur.* 2021. V. 29. 100545. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100545>
3. *Gu Yu., Ros G.H., Zhu Q., Zheng D., Shen J., Cai Z., Xu M., de Vries W.* Responses of total, reactive and dissolved phosphorus pools and crop yields to long-term fertilization // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2023. V. 357. 108658. DOI:10.1016/j.agee.2023.108658
4. *Li B., Ng S.J., Han J.-C., Li M., Zeng J., Guo D., Zhou Y., He Z., Wu X., Huang Y.* Network evolution and risk assessment of the global phosphorus trade // *Sci. Total Environ.* 2023. V. 860. № 20. 160433. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160433>
5. *Tilman D., Balzer C., Hill J., Befort B.L.* Global food demand and the sustainable intensification of agriculture // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* 2011. V. 08(50). P. 20260–20264. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116437108>
6. *Jagdeep-Singh, Gobinder-Singh, Gupta N.* Balancing phosphorus fertilization for sustainable maize yield and soil test phosphorus management: A long-term study using machine learning // *Field Crops Res.* 2023. V. 304. 109169. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109169>
7. *Hu W., Li C.-H., Ye C., Wang J., Wei W.-W., Deng Y.* Research progress on ecological models in the field of water eutrophication: CiteSpace analysis based on data from the ISI web of science database // *Ecol. Model.* 2019. V. 410. 108779. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2019.108779>
8. *Сычев В.Г.* Современное состояние плодородия почв и основные аспекты его регулирования. М.: РАН, 2019. 328 с.
9. *Муравин Э.А.* Агрохимия: учебник и учеб. пособ для студ сред. учеб. завед. М.: КолосС, 2004. 384 с.
10. *Кирюшин В.И.* Минеральные удобрения как ключевой фактор развития сельского хозяйства и оптимизации природопользования // *Достиж. науки и техн. АПК.* 2016. Т. 30. № 3. С. 19–25.
11. *Смирнов П.М., Муравин Э.А.* Агрохимия: учеб-к для вузов. М.: Колос, 1977. 240 с.
12. *Каренгина Л.Б., Байкенова Ю.Г.* К методике расчета комплексного агрохимического окультуривания полей // *Аграрн. вестн. Урала.* 2016. № 8(150). С. 31–37.

13. Сычев В.Г., Шафран С.А., Виноградова С.Б. Плодородие почв России и пути его регулирования // *Агрохимия*. 2020. № 6. С. 3–13.
14. Реестр длительных стационарных полевых опытов ГНУ СО Россельхозакадемии. Новосибирск: ИИЦ ЦНСХБСО РАСХН, 2009. 287 с.
15. Сорокин О.Д. Прикладная статистика на компьютере. Новосибирск: СО РАСХН, 2008. 217 с.
16. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 656 с.
17. Берхин Ю.И., Чагина Е.Г. Одновременное определение азота нитратов и фосфора в солевой (0.03 н. K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) вытяжке // *Агрохимия*. 1983. № 1. С. 119–121
18. Куркаев В.Т. Ускоренное определение азота, фосфора и калия в растениях из одной навески // *Почвоведение*. 1959. № 9. С. 114–117.
19. Методика расчета баланса элементов питания в земледелии Республики Беларусь. Минск: БНИВНФХ в АПК, 2007. 24 с.
20. Данилова А.А. Оптимальные дозы фосфорных удобрений (к почвенно-биохимическим аспектам проблемы) // *Сибир. вестн. с.-х. науки*. 2019. № 49(3). С. 5–15.  
<https://doi.org/10.26898/0370-8799-2019-3-1>
21. О ходе приобретения минеральных удобрений в 2020 г. и планы по приобретению до 2025 г. М.: / Минсельхоз РФ, 2020. [Электр. ресурс]. URL: <https://mcx.gov.ru/upload/iblock/4a5/4a5e8900ca37701862e106b46d2f0abe.pdf> (дата обращения: 10.07.2023).
22. Вольнкин В.И., Копылов А.Н., Вольнкина О.В. Влияние минеральных удобрений на урожайность культур и агрохимические свойства выщелоченного чернозема // *Плодородие*. 2014. № 6. С. 14–16.
23. Вольнкина О.В., Вольнкин В.И., Кириллова Е.В., Копылов А.Н. Системы удобрения в агротехнологиях Зауралья. Куртамыш: ООО “Куртамышская типография”, 2017. 284 с.
24. Храпцов И.Ф. Агрохимические аспекты управления плодородием черноземных почв равнинных ландшафтов Западной Сибири // *Агрохимические свойства почвы и приемы их регулирования: Мат-лы Международ. научн.-практ. конф. IV Сибирских агрохимических Прянишниковских чтений (Иркутск, 16–21 июля 2007 г.)*. Новосибирск: РАСХН, СО, 2009. С. 23–33.

## Optimal Dose of Phosphorus Fertilizers for Grain Agroecosystems in Ob Region

S. A. Kolbin<sup>a</sup>, A. A. Danilova<sup>a, #</sup>, A. G. Rakhlenko<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Siberian Federal Scientific Centre of Agrobiotechnologies of the RAS,  
ul. Centralnaya 26, Novosibirsk district, Krasnoobsk 630501, Russia

<sup>#</sup>E-mail: Danilova7alb@yandex.ru

The need to intensify the agricultural sector to ensure the food security of the growing population of the planet against the background of depletion of natural sources of phosphorous raw materials leads to an increase in the costs of agricultural producers for phosphorus fertilizers (PF), which increases the urgency of the problem of optimizing the doses of the latter. Based on the generalization of the results of long-term field experiments, the economic and environmental validity of different approaches to calculating doses of PF for cereals in the Ob region was compared. The study was conducted in 2006–2017 in long-term experiments of the SFNCA RAS on leached medium loamy medium humus chernozem in the Central forest steppe of the Ob region (54°53'13.5" n.w., 82°59'36.7" e.l.). Calculations were performed based on the results of observations in 3 crop rotations: 3-field grain-fallow (fallow–wheat–wheat), in 4-field grain-fallow (fallow–wheat–wheat–barley), in 4-field grain-fallow (fallow–wheat–wheat–wheat). The duration of the experiments was 18, 23, 38 years, respectively. The experiments were carried out against the background of nitrogen fertilizers with a complete scheme of plant protection from harmful organisms. A high agronomic efficiency of PF application has been established: the increase in grain yield with the use of P15–P30 averaged 0.5–1.2 t/ha. Phosphorus removal by the grain harvest (its alienation from the field) in the control variants was ≈20 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha of the crop area, in the variants with fertilization it reached 30 kg/ha. Its removal by aboveground biomass was 1.6 times greater and reached 48 kg/ha. The phosphorus balance in the soil in the variants of experiments without the introduction of PF was deficient (–15...–27 kg/ha), with the introduction of P15 its deficit was –11 kg/ha, with a dose of P30 the balance was positive, i.e. the phosphorus intake was excessive. Two indicators were considered as evidence of excess doses of PF >P30 for grain agroecosystems in the forest steppe of the Ob region: accumulation of mobile mineral phosphorus in the soil and an increase in the fraction of enzymatically available phosphorus, these pools can become a source of phosphorus losses from agroecosystem. It is concluded that for the leached chernozem of the Ob region, the calculation of doses of phosphorus fertilizers based on the amount of phosphorus alienation by the grain harvest is more justified from an economic and environmental point of view in comparison with the calculation based on the amount of removal of the element by the entire aboveground (grain + straw) biomass of plants.

**Keywords:** phosphorus fertilizers, agroecosystem, crop rotation, crops, phosphorus alienation by grain harvest, phosphorus removal by aboveground biomass, phosphorus balance in soil.

УДК 631.559:633.11«321»:631.811

## УРОЖАЙНОСТЬ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ И КАЧЕСТВО ЗЕРНА ПРИ ЭФФЕКТИВНОМ ПРИМЕНЕНИИ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ<sup>§</sup>

© 2024 г. О. В. Волынкина\*

Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения РАН  
620142 Екатеринбург, ул. Белинского, 112а, Россия

\*E-mail: kniish@ketovo.zaural.ru

Обобщение результатов 4-х полевых опытов, агрохимические и агротехнические характеристики которых существенно отличались, показало общие и предельные приросты урожайности сельскохозяйственных культур при применении минеральных удобрений. Опыты проведены в разных почвенно-климатических зонах Курганской обл.: на тяжелосуглинистом обыкновенном чернозёме в одном из хозяйств Альменевского р-на и на 2-х опытных полях Курганского НИИСХ – Центральном (на среднесуглинистом выщелоченном черноземе) и Шадринском (на тяжелосуглинистом выщелоченном черноземе). Вид обработки почвы: в 3-х опытах – вспашка и севооборот, в 4-м – бессенная пшеница на стерневом фоне. Фосфорное удобрение давало высокие прибавки урожайности на фонах с содержанием подвижного  $P_2O_5$  в слое 0–20 см почвы от 30 до 50 мг/кг, при содержании 74 мг  $P_2O_5$ /кг действовало слабо. При испытании доз азота и фосфора первый их уровень обеспечивал наибольшую и лучше окупаемую предельную прибавку в сравнении с приростами от следующих доз удобрения. Удобрение оказывало положительное влияние на урожайность пшеницы и белковость зерна. Достижение 3-го класса качества зерна относилось к 60–90% лет в опытных вариантах при 40–50% лет в контроле. Вполне определенно можно заключить, что на фонах с содержанием в почве 74 мг  $P_2O_5$ /кг следует обходиться только азотным удобрением; дозу азота снижать до N40–50, дозу фосфора – до P15–20 с применением припосевного способа внесения фосфорного удобрения. При этих условиях рентабельность удобрения повышалась до 45–73% по сравнению с низкими и отрицательными показателями в других вариантах.

*Ключевые слова:* эффективность удобрений, технология выращивания культур, севооборот, предельная прибавка от удобрения, рентабельность.

DOI: 10.31857/S0002188124080045, EDN: CEGRCE

### ВВЕДЕНИЕ

Выявление роли разных факторов, определяющих урожайность в одном из опытов в ЦЧР [1] показало, что погодные условия влияли на 51%, удобрения – на 30% и обработка почвы – на 3%. В других работах удобрения имели бóльшую долю участия в продуктивности культур – до 45–50% [2]. Эффективная система применения минеральных удобрений предусматривает следующие цели:

<sup>§</sup> Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования по теме № 0532-2021-0002 “Усовершенствовать систему адаптивно-ландшафтного земледелия для Уральского региона и создать агротехнологии нового поколения на основе минимизации обработки почвы, диверсификации севооборотов, интегрированной защиты растений, биологизации, сохранения и повышения почвенного плодородия и разработать информационно-аналитический комплекс компьютерных программ и баз данных, обеспечивающий инновационное управление системой земледелия”.

повышение урожайности сельскохозяйственных культур с улучшением его качества при высокой оплате удобрений приростом урожая; при этом должны быть предусмотрены сохранение или повышение плодородия почвы и охрана окружающей среды [3]. Авторы методики проектирования системы удобрений [4] подчеркивали принцип индивидуальности участка, для которого предназначена система. Точное земледелие означает не только дифференцированное внесение удобрений, но и уточнение оптимальных доз удобрений в полях севооборота. В опыте [5] в Тюменской обл. оценили пестроту почвенного покрова поля по величине содержания питательных веществ, коэффициент вариации был равен 26%. При сравнении урожайности яровой пшеницы на фонах применения средней дозы удобрений для всего поля и дифференцированного внесения она оказалась больше при традиционном способе. При дифференцированном способе сбор зерна был несколько меньше,

и вариабельность величины урожайности повысилась с 10 до 19%.

Применение фосфорного удобрения существенно повышает содержание подвижного фосфора в почве, что отмечено во многих работах, в которых изучили связь изменений средних доз фосфора, внесенных в пятилетия за 1970–2010 гг., и содержания подвижного фосфора, определенного в циклах обследования почв [6–9]. Показано, что с уменьшением объема внесения фосфорного удобрения содержание подвижного  $P_2O_5$  в почве сохранялось на уровне 100–116 мг/кг, что объясняется значительным последствием фосфорных удобрений [10, 11].

Для нахождения оптимальных доз более информативным оказалось знание предельного прироста урожая от каждого шага повышения дозы в полевом опыте. Добавление переменных средств к основным ресурсам выгодно до тех пор, пока дополнительный доход превышает дополнительный расход [12]. Оптимальной окупаемостью считается получение 9–10 кг дополнительного зерна на 1 кг д.в. удобрений [13]. Нахождение хорошо оплачиваемых прибавкой урожая доз азота или фосфора более удобно в полевых стационарных опытах с большим набором доз. В таких экспериментах виден эффект предельной дозы, которая равняется шагу ее изменения. В почвах пашни Курганской обл. достаточно только обменного калия, а для улучшения питания растений азотом и фосфором необходимо применение минеральных удобрений [14]. Цель работы – показать оплату разных доз удобрений предельными прибавками урожайности пшеницы в различных севооборотах и в ее бессменных посевах при изучении состава удобрения и возрастающих его доз в 4-х опытах: в хозяйстве “Могучий” Альменевского р-на Курганской обл., на Центральном и Шадринском (северо-запад области) опытных полях Курганского НИИСХ.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено в Курганском научно-исследовательском институте сельского хозяйства – филиале УрФАНИЦ УрО РАН – в лабораториях агрохимии и земледелия.

Агроклиматические показатели центральной и северо-западной зон Курганской обл. следующие: осадки за год в первой из них – 350–369 мм, за вегетацию – 190–207 мм, во второй – соответственно 350–422 и 200–228 мм; период с температурой воздуха  $>10^{\circ}C$  – 130–134 и 122–133 сут. Для лучшего восприятия материала опыты пронумерованы. Опыт 1 в Альменевском р-не проводил В.И. Волынкин с помощниками на сменяемых участках в 1977–1979 гг. Опыт 2 – стационарный, заложен В.И. Волынкиным в 1971 г. на Центральном опытном поле Курганского НИИСХ. Севооборот зернопропашной: кукуруза–две пшеницы–овес. С 1993 г. по настоящее время исполнитель опыта – О.В. Волынкина.

С 1971 по 1998 гг. сравнивали эффективность 3-х доз одного азота с фосфором, ежегодно вели вспашку. Изучали дозы азота – N40–80–120 на кукурузе и N20–40–60 на зерновых культурах, в среднем в севообороте – N25–50–75. Опыт 3 тоже стационарный, заложен В.И. Овсянниковым в 1972 г. на Шадринском опытном поле, 40 лет исследования вели сотрудники Г.Н. Харин и В.П. Новоселов. Опыт 4 (исполнитель О.В. Волынкина) с бессменной пшеницей после стерни создан на базе опыта 2 в 1999–2000 гг. Те же вопросы стали исследовать при новой технологии, распространившейся в производственной практике. Дозы азота N20–40–60, фосфора – P20. Агрохимические свойства почвы 2-х опытных полей показаны в табл. 1. Повышение содержания подвижного  $P_2O_5$  до 74 мг/кг в Шадринском опыте произошло по мере постепенного зафосфачивания почвы пашни опытного поля, где опыты с удобрениями начаты были в 1916 г.

**Таблица 1.** Агрохимические показатели почвы опытных полей Курганского НИИСХ (слой 0–20 см)

Показатель	Поле	
	Центральное	Шадринское
Подтип чернозема	Выщелоченный	Выщелоченный
Гранулометрический состав	Среднесуглинистый	Тяжелосуглинистый
pH <sub>KCl</sub> 1972/2008 г.	6.3/5.2	6.5/5.1
Содержание гумуса, %	4.5	5.3–7.4
$P_2O_5$ по Чирикову, мг/кг	37–50	74
$K_2O$ по Чирикову, мг/кг	250–300	120–150
N- $NO_3$ под посевом 1-й после пара культуры, кг/га, слой 0–100 см	117	85
N- $NO_3$ под посевом 2–3-й культуры, кг/га, слой 0–100 см	42–55	49–58

Состав и дозы удобрений сравнили в зернопаровом и зернопропашном севооборотах и в посевах бессменной пшеницы. Обработка почвы: в 3-х опытах – вспашка, в опыте 4 – с осени стерневой фон. Повторность вариантов трехкратная. Общая площадь делянок – 200–240–270 м<sup>2</sup>, учетная 80–90 м<sup>2</sup>. Удобрения – аммиачная селитра и двойной суперфосфат, в последние годы – аммофос. Их вносили весной дисковой сеялкой СЗ-3.6 на глубину 5 см до применения новых порций удобрений. Высевали районированные сорта сельскохозяйственных культур. Зерновые культуры в севооборотах сеяли сеялкой СЗ-3.6, кукурузы – сажалкой СУПК; в повторных посевах пшеницы после стерни – стерневой сеялкой СКП-2.1 с сошником культиваторного типа. Урожай зерновых культур учитывали напрямую комбайном Samro-500 с отбором образца зерна для определения влажности и сорности бункерной массы. Кукурузу скашивали с площадки 14 м<sup>2</sup>, взвешивали, определяли влажность для пересчета урожая на сухое вещество. Анализ данных опытов проведен автором статьи.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Опыт 1.* Результаты трехлетних испытаний доз суперфосфата в опыте на тяжелосуглинистом обыкновенном солонцеватом черноземе сельскохозяйственного предприятия “Могучий” Альменевского р-на Курганской обл. представлены в табл. 2.

В почве участка под опытом отмечено низкое содержание подвижного Р<sub>2</sub>О<sub>5</sub> по Чирикову – 36 мг/кг. Альменевский р-н входит в центральную зону Курганской обл. При снижении дозы фосфора до Р15, внесенной в рядки при посеве, прибавка 6.2 ц/га означала высокую окупаемость – 41 кг зерна/кг д.в. суперфосфата. Дальнейшее повышение дозы оказалось нецелесообразным. Этот вывод особенно ценен при анализе оплаты затрат на удобрение в рублях, т.к. цены на удобрения выросли,

а на зерно пшеницы – снизились. В 2022 г. при стоимости 1 т аммофоса 57 тыс. руб., зерна пшеницы 10–12 тыс. руб., 1 кг фосфора обходился 114 руб., 1 кг зерна – 10–12 руб., т.е. превышение цены удобрения над стоимостью зерна было равно 9.5 раза. Покупка аммофоса для применения Р15 составила 1740 руб./га, а с расходами на перевозку, внесение и уборку дополнительного урожая – 3639 руб./га. Доход от увеличения урожая 6200 руб./га означал прибыль 2561 руб./га и рентабельность 70%. При применении 2-й дозы Р15 доход был меньше – 2200 руб./га, затраты – 2359 с отрицательными величинами прибыли и рентабельности: –159 руб./га и –6.7%.

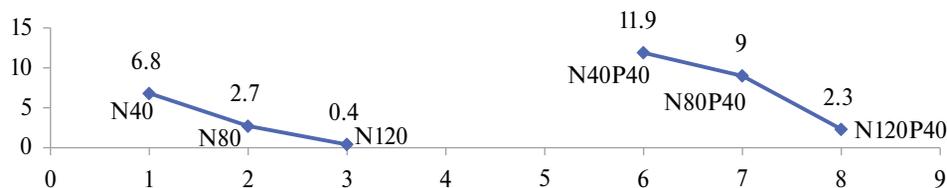
*Опыт 2.* При аналогичной оценке эффектов от применения доз азотного удобрения по величине предельных прибавок выявлена окупаемость каждого шага роста дозы азота. Исследование вели в севообороте кукуруза–две пшеницы–овес, оплата удобрений резко снижалась при повышении дозы азота до 3-го уровня. Очевидной эта закономерность была при рассмотрении изменений предельных прибавок урожая сухого вещества кукурузы. На рис. 1 приведены прибавки урожая сухого вещества кукурузы в зависимости от 3-х доз N40 без фосфора и на его фоне.

Растения хорошо отзывались на включение в удобрение фосфора, что было обосновано низким содержанием подвижного Р<sub>2</sub>О<sub>5</sub> в среднесуглинистом выщелоченном черноземе участка под опытом (37–40 мг/кг по Чирикову). От совместного внесения азота и фосфора эффект повышался почти вдвое.

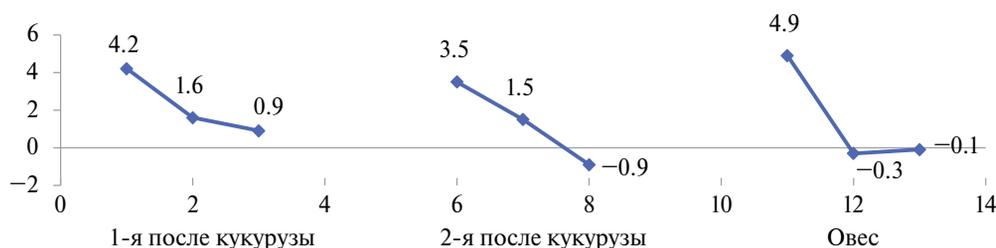
Первая доза азота N40 на фоне Р40 повысила сбор сухого вещества кукурузы на 11.9 ц/га, 2-я – 9, 3-я – только на 2.3 ц/га. Постепенно оплата предельной дозы N40 на фосфорном фоне снижалась (в кг сухого вещества/кг азота) с 29.8 до 22.5 и 5.8. Окупаемость смесей удобрений N40Р40 и N80Р40 составила 14.9 и 17.4 кг/кг.

**Таблица 2.** Оплата разных доз припосевного внесения фосфора общей и предельной прибавками урожайности 1-й пшеницы после пара (1977–1979 гг.), кг/кг д.в.

Доза	Урожайность, ц/га	Прибавка, ц/га		Окупаемость 1 кг д.в. прибавкой, кг/кг	
		общая	предельная	общей	предельной
Контроль	24.2	–	–	–	–
Р15	30.4	6.2	6.2	41	41
Р30	32.6	8.4	2.2	28	15
Р45	33.5	9.3	0.9	20	6
Р60	34.7	10.5	1.2	16	10
Р90	34.2	10.0	–0.5	11	–3
<i>HCP</i> <sub>05</sub>		0.9–2.7			



**Рис. 1.** Предельные прибавки урожайности сухого вещества кукурузы при увеличении доз удобрений на N40 без фосфора и на его фоне (1971–1998 гг., в контроле – 41.9 ц с.в./га,  $HCP_{05} = 11$  ц с.в./га, Центральное опытное поле), ц/га.



**Рис. 2.** Предельные прибавки зерна при увеличении доз удобрения на N20 при применении N20–40–60 на фоне P40 в посевах зерновых культур в зернопропашном севообороте (1971–1998 гг., урожайность пшеницы в контроле = 16.8, 15.8, овса – 23.8 ц/га,  $HCP_{05} + 1.7, 2.3, 1.3$  ц/га), ц/га.

Для зерновых культур эффективность азота в дозах N20–40–60 на фоне P40 свидетельствовала о выгодном уровне применения азота в посевах пшеницы после кукурузы только при применении 1-й и 2-й из испытанных доз и лишь 1-й дозы – на овсе (рис. 2).

При развитой корневой системе овса его урожайность была значительно больше, чем пшеницы. Прирост урожайности овса останавливался после применения 1-й дозы удобрения. В посеве 1-й пшеницы после кукурузы 1-я доза азота N20 на фосфорном фоне оплачивалась высоко – 21 кг зерна/кг азота (420 кг зерна : 20), 2-я – 8 (160 : 20) и 3-я доза – всего 4.5 (90 : 20). В посеве 2-й пшеницы после кукурузы закономерности изменения оплаты 3-х доз с шагом N20 на фоне P40 были похожими лишь для 1-й и 2-й доз азота. С переходом к 3-й дозе эффект был отрицательным при окупаемости 17.5, 7.5 и –4.5 кг/кг. В посеве овса оплата 1-й дозы азота достигла 24.5 кг/кг, далее она резко снижалась.

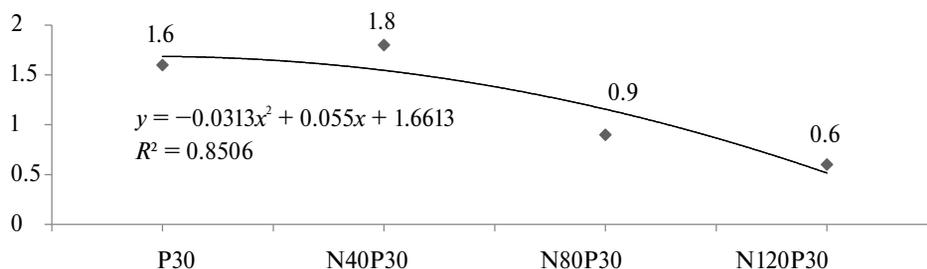
**Опыт 3.** По-другому действовали удобрения на тяжелосуглинистом выщелоченном черноземе Шадринского опытного поля Курганского НИИСХ, где содержание подвижного фосфора составляло 74 мг/кг (табл. 1). По откорректированной для местных условий шкале Чирикова показатель 74 мг/кг означал класс повышенной обеспеченности. Поэтому внесение фосфорного удобрения в дозе P30 дало небольшую среднюю прибавку 1.6 ц/га даже в посеве 1-й пшеницы после пара, где обычно фосфор обеспечивает высокий эффект.

При добавлении к фосфору азота в варианте N40P30 отмечено его слабое влияние на 1-ю культуру после пара. От совместного применения фосфора и азота получен прирост 3.4 ц/га к контролю, от азота по отношению к фону P30 – 1.8 ц/га при урожайности 1-й пшеницы в контроле 24.7 ц/га. В паровом поле на Шадринском опытном поле в среднем накапливалось нитратного азота 85 кг/га в 1-метровом слое почвы при 117 кг/га на Центральном опытном поле (табл. 1). Тем не менее, применение азота в 1-м посеве после пара было малоэффективным. Предельные прибавки урожая 1-й пшеницы при переходе от варианта P30 к насыщению севооборота дозами N40–80–120P30 (непосредственно в посеве 1-й пшеницы вносили N40) показаны на рис. 3.

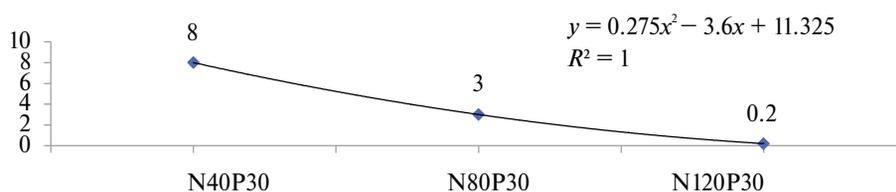
С удалением во времени посева от пара фон P30 действовал также слабо, повышая урожайность пшеницы на 0.3–0.6 ц/га и в повторных посевах – на 0.5 ц/га, но при этом высокоэффективным становился азот. В посеве 2-й пшеницы после пара средняя прибавка от применения N40P30 была равна 8.6 ц/га, а предельный прирост к фону P30 – 8.0 ц/га (рис. 4).

При применении 2-х следующих доз N40 предельные прибавки урожайности снижались до 3.0 и 0.2 ц/га. Оплата доз в кг зерна на 1 кг азота уменьшалась с 20 до 7.5 и 0.5 кг зерна.

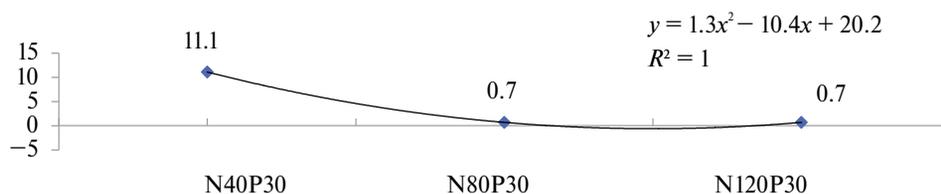
В конце севооборота в 1-метровом слое почвы содержание нитратного азота было значительно меньше – 49–58 кг/га, повышалась засоренность



**Рис. 3.** Предельные прибавки урожая зерна 1-й пшеницы после пара при увеличении доз азота с шагом N40 в вариантах P30N40–80–120 по сравнению с фоном P40 (Шадринское опытное поле, 1972–2011 гг., урожайность в контроле = 24.7 ц/га,  $HCP_{05}$  = 1.1–1.9 ц/га), ц/га.



**Рис. 4.** Предельный прирост урожая зерна 2-й пшеницы после пара при увеличении доз азота с шагом N40 в вариантах N40–80–120P30 по сравнению с фоном P30 (Шадринское опытное поле, 1972–2011 гг., урожайность в контроле = 17.0 ц/га,  $HCP_{05}$  = 2.2–2.7 ц/га), ц/га.



**Рис. 5.** Предельный прирост урожая зерна 3-й пшеницы после пара при увеличении доз удобрений с шагом N40 в вариантах N40–80–120P30 по сравнению с фоном P30 (Шадринское опытное поле, 1972–2011 гг., урожайность в контроле = 15.4 ц/га,  $HCP_{05}$  = 1.6–2.9 ц/га), ц/га.

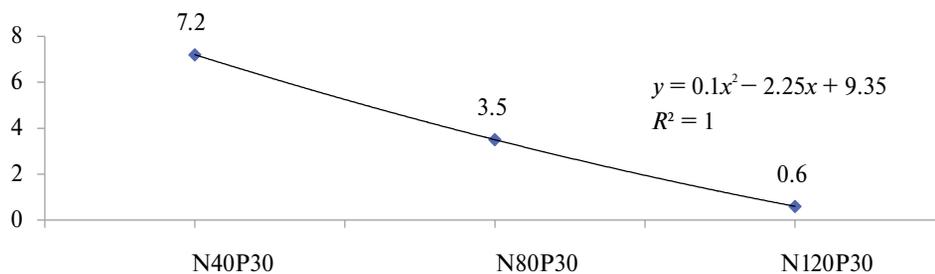
посева, что вызывало высокую отзывчивость пшеницы на улучшение азотного питания. Прирост от применения P30 в этом поле составил 0.3 ц/га, тогда как от N40P30 он достиг 11.4 ц/га и непосредственно от N40 – 11.1 ц/га при урожайности в контроле 15.4 ц/га. Применение 2-х следующих доз N40 дало дополнительно по 0.7 ц/га (рис. 5). Оплата 1 кг азота прибавкой с повышением дозы уменьшалась с 28 до 1.75 кг зерна.

Бессменные посевы пшеницы в этом эксперименте исследованы, как и пшеницы в севообороте с паром, в условиях ежегодной вспашки. Однако их урожайность без удобрения ограничивалась средним уровнем 14.1 ц/га. Фон P30 дал прибавку 0.5 ц/га, а на азот отзывчивость растений была высокой с повышением урожайности бессменной пшеницы на 7.2 ц/га (рис. 6) и оплатой 1 кг азота 18 кг зерна.

Следующая доза N40 дала дополнительную прибавку 3.5 ц/га с неплохой окупаемостью 8.8 кг зерна/кг азота. Дальнейшее увеличение дозы азота было неэффективным, т.к. предельная прибавка урожайности снизилась до 0.6 ц/га с оплатой 1.5 кг/кг.

Благодаря более стабильному и достаточному уровню увлажнения посевов в северо-западной зоне Курганской обл. в части лет опыта прибавки урожая, в отличие от их средней величины, в зависимости от варианта опыта повышались до 9–14–18–22 ц/га соответственно. Наибольшая доля прибавок такого уровня отмечена во 2-м, 3-м посевах после пара и в посевах бессменной пшеницы (табл. 3).

От применения удобрений улучшалось качество зерна пшеницы. Выращивание высокобелковой пшеницы в более влажной и урожайной северо-западной зоне Курганской обл. удастся



**Рис. 6.** Предельный прирост урожая бессменной пшеницы при увеличении доз азотных удобрений с шагом N40 в вариантах N40–80–120P30 по сравнению с фоном P30 (Шадринское опытное поле, 1972–2011 гг., урожайность в контроле 14.1 ц/га,  $HCP_{05} = 2.1–2.7$  ц/га), ц/га.

**Таблица 3.** Повторяемость прибавок разной величины при применении N40P30, % лет

Величина прибавки, ц/га	1-я пшеница после пара	2-я пшеница после пара	3-я пшеница после пара	Бессменная пшеница
9–22	2	48	60	40
5–8	10	32	20	30
2–4	28	15	18	25
0–1	60	5	2	5

**Таблица 4.** Влияние удобрений на содержание клейковины в зерне пшеницы в разных полях севооборота и при ее бессменном возделывании (среднее за 1972–2011 гг.), %

Место пшеницы в севообороте	Варианты				
	Контроль	P30	N40P30	N80P30	N120P30
Содержание клейковины в зерне, %					
1-я после пара	27.8	27.6	29.7	30.6	30.8
2-я после пара	24.6	24.0	25.5	30.4	31.2
3-я после пара	22.3	22.8	26.9	28.1	31.6
Бессменная	22.3	22.8	25.8	29.9	31.1
Повторяемость 3-го класса качества пшеницы за 40 лет опыта, % лет					
1-я после пара	85.0	82.5	92.5	92.5	95
2-я после пара	62.5	52.5	77.5	92.5	97.5
3-я после пара	47.5	47.5	87.5	95	100
Бессменная	42.5	42.5	67.5	92.5	97.5

реже. Поэтому большой интерес представляет анализ качества зерна пшеницы в этом опыте. Вторая и третья дозы азота в вариантах N80–120P30, слабее действуя на урожайность, имели преимущество влияния на содержание клейковинных белков в зерне. Больше в этих вариантах было и число лет с выращиванием зерна 3-го класса (табл. 4).

С переходом дозы азота от N40P30 к N80P30 содержание клейковины возрастало в среднем на 4–5%. Проявилось различие этого эффекта в зависимости от поля севооборота. В посеве 1-й пшеницы после пара улучшение качества зерна от повышения дозы азота до N80P30 отмечено всего 5 раз за 40 лет, а в следующем поле – 20 раз.

В конце севооборота эффект наблюдали 6 лет, а в посевах бессменной пшеницы – в течение 17 лет. Увеличение дозы от N80P до N120P редко обеспечивало существенное повышение содержания клейковины у 1-й пшеницы после пара, в других полях – 3 и 7 раз и в посеве бессменной пшеницы – 3 года. К сожалению, шаг изменения дозы азота (40 кг/га) в этом опыте был завышен для более точной оптимизации применения аммиачной селитры.

Повторяемость по годам качества зерна 3-го класса в 1-м посеве после пара без удобрения при формировании высокой урожайности 24.7 ц/га за 40-летний период опыта составила 85%

**Таблица 5.** Экономическая эффективность доз удобрений в опыте на Шадринском опытном поле, по данным за 1972–2011 гг.

Вариант	Затраты на удобрение, руб./га	Общая прибавка, ц/га / цена 1 ц с учетом качества зерна*	Стоимость прибавки, руб./га	Прибыль, руб./га	Рентабельность, %
P30 1-я пшеница после пара	4412	1.6 / 1175	1880	–2532	–57
N40P30 1-я пшеница после пара	8841	3.4 / 1190	4046	–4795	–54
N40P30 2-я пшеница после пара	9595	8.6 / 1166	10 028	434	4.5
N80P30 2-я пшеница после пара	12 331	11.8 / 1189	14 030	1699	13.7
N40P30 3-я пшеница после пара	10 001	11.4 / 1181	13 463	3462	34.6
N80P30 3-я пшеница после пара	12 374	12.1 / 1192	14 423	2049	16.5
N40P30 в посеве бессменной пшеницы	9464	7.7 / 1151	8863	–601	–6.3
N80P30 в посеве бессменной пшеницы	12 708	11.2 / 1189	13 317	609	4.8
С уменьшением доз					
P15 1-я пшеница после пара	2672	1.6 / 1175	1880	–792	–30
N50P15 2-я пшеница после пара	7764	9.6 / 1170	11 232	3462	45
N50 2-я пшеница после пара	5392	8.0 / 1166	9328	3936	73

\* Цена пшеницы установлена согласно повторяемости 3-го класса качества зерна в опыте, основываясь на стоимости 3- и 4-го классов в 2022 г. – 1200 и 1050 руб./ц соответственно.

лет. Улучшение условий азотного питания позволяло повысить частоту проявления 3-го класса качества до 92.5–95% лет. В следующих 2-х полях без внесения удобрения 3-й класс качества отмечали реже – в 62.5 и 47.5% лет соответственно. Фосфор в этом эксперименте не менял или уменьшал частоту получения 3-го класса пшеницы, а при применении его с азотом в дозе N80 3-й класс отмечен почти все 40 лет.

В подборе оптимальных доз удобрений для производственной практики наряду с результатами обсуждаемого опыта учитывали материалы параллельных экспериментов с дозами азотного и фосфорного удобрений. Совокупный анализ данных нескольких экспериментов позволил заключить, что в посеве 1-й пшеницы после пара вполне достаточны дозы P15, в посевах 2- и 3-й и бессменной – N30–50 без фосфора при содержании подвижного P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 74 мг/кг. Недостаток высокобелкового зерна можно компенсировать использованием повышенных доз азота на небольших участках с дальнейшим подмешиванием сильной пшеницы к партиям ценной или слабой.

Экономическая оценка приемов удобрения сделана по ценам, сложившимся в 2022 г. Насыщение 1 га пашни зернопарового севооборота дозой удобрения N40P30 в 1-м посеве после пара приводило к отрицательному показателю рентабельности,

тогда как в посеве 3-й культурой оно обеспечило рентабельность 34.6%. Доза азота N80 на фоне P30 мало оправдала себя во всех посевах. При этой дозе рентабельность во 2- и 3-м полях после пара и в посевах бессменной пшеницы ограничивалась величинами 13.7, 16.5 и 4.8% соответственно. Эффективность применения меньших доз удобрений, которые больше пригодны для полей с подобной агрохимической характеристикой почвы, как на участке под опытом, была выражена лучшими экономическими показателями (табл. 5).

*Опыт 4.* В 3-х приведенных исследованиях в качестве основной обработки почвы вели вспашку, поскольку в настоящее время в земледелии Курганской и других областей она занимает небольшую долю – в основном ведут мелкую обработку, а на части полей с осени оставляют стерню. Основываясь на этом, на базе опыта 2 на Центральном поле с 1999–2000 гг. изучение состава удобрения и доз азота продолжено в посевах бессменной пшеницы после стерни. В этой технологии также азотно-фосфорное удобрение имело преимущество перед применением одного азота. Однако при замене зернопарового севооборота (кукуруза–две пшеницы–овес) бессменной пшеницей, а вспашки – стерневым фоном продуктивность посева снизилась. В опыте 2 в севообороте при ежегодной вспашке без удобрения средняя урожайность пшеницы равнялась 16.8 ц/га в 1-м поле

**Таблица 6.** Действие удобрений на урожайность бессменной пшеницы в опыте 4 (1999–2022 гг.)

Вариант	Урожайность, ц/га	Общая прибавка, ц/га	От добавления фосфора, ц/га	Предельная прибавка, ц/га
N0P0	10.0	—	—	—
N20	11.8	1.8	—	1.8
N40	12.4	2.4	—	0.6
N60	12.2	2.2	—	–0.2
N20P20	13.4	3.4	1.6	3.4
N40P20	15.6	5.6	3.2	2.2
N60P20	16.4	6.4	4.2	0.8
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	1.2–3.2			

**Таблица 7.** Влияние удобрений на качество зерна бессменной пшеницы (2000–2022 гг.)

Вариант	Повторяемость 3-го класса качества за 23 года, % лет	Содержание клейковины в зерне бессменной пшеницы, %	Сбор клейковины с урожаем, кг/га	
			сбор	прибавка
N0P0	43	22.0	220	—
N20	61	25.2	297	77
N40	65	26.2	325	105
N60	78	28.0	342	122
N20P20	43	22.3	299	79
N40P20	65	26.0	406	186
N60P20	74	27.6	453	233

после кукурузы, 15.8 – во 2-м поле. В повторных посевах после стерни она уменьшилась до 10.0 ц/га. В действии доз азота в сочетании с аммофосом дополнительный прирост урожая бессменной пшеницы, как и ранее в севообороте, понижался с переходом к 3-й дозе (табл. 6).

Определенную роль в снижении сбора зерна сыграло увеличение числа засушливых лет в годы выращивания бессменной пшеницы. При одновременной оценке урожайности и содержания белков в зерне пшеницы дозы N40–60 в азотно-фосфорном удобрении имели большее преимущество перед дозой N20 (табл. 7).

На фоне меньшей из испытанных доз N20P20 содержание клейковины в зерне пшеницы оставалось на уровне контроля. Частота получения 3-го класса качества зерна в этом варианте была та же, как и в контроле – в 43% лет (в основном в засушливые годы). Надежное выращивание пшеницы 3-го класса обычно обеспечивают посевы после пара, которые характеризовались в исследованиях Курганского НИИСХ 90–100%-ной частотой выращивания ценной пшеницы. В повторных посевах пшеницы после стерни за 23 года применения N40–60P20 3-й класс качества отмечен в 65–74% лет.

## ВЫВОДЫ

1. В опыте 1 в хозяйстве “Могучий” Альменевского р-на Курганской обл. в тяжелосуглинистом обыкновенном солонцеватом черноземе отмечено низкое содержание подвижного  $P_2O_5$  (36 мг/кг), за счет чего проявился высокий эффект от припосевного внесения суперфосфата. Способ его применения и снижение дозы до P15 позволили иметь окупаемость 41 кг зерна/кг фосфора. Следующие шаги P15 при увеличении дозы фосфорных удобрений были не эффективными.

2. В опыте 2 в посевах на среднесуглинистом выщелоченном черноземе Центрального опытного поля Курганского НИИСХ при низком содержании подвижного  $P_2O_5$  (37–50 мг/кг) все культуры севооборота положительно отзывались на добавление к азоту фосфора. Прибавки от включения в удобрение P40 повышались почти вдвое по сравнению с внесением одного азота. Из доз азота более высоко оплачивались 1-й и 2-й уровни доз в посевах кукурузы и пшеницы, а в посевах овса высоко окупался только 1-й уровень N25.

3. В опыте 3 на Шадринском опытном поле на тяжелосуглинистом выщелоченном черноземе при содержании подвижного  $P_2O_5$  74 мг/кг применение фосфора сопровождалось незначительным

действием во всех полях зернопарового севооборота с прибавками зерна от 0.5 до 1.6 ц/га. Азот в посевах 1-й пшеницы после пара действовал тоже слабо, но при удалении посевов во времени от парового поля давал высокие прибавки урожая. Приросты зерна от N40 достигали в среднем 8–11 ц/га, за счет чего урожайность повышалась с 17.0 и 15.4 в контроле до 25–27 ц/га. Добавление еще N40 повышало эффект только в посевах 2-й пшеницы после пара, но прибавка составила лишь 3.0 ц/га.

4. В повторных посевах пшеницы без удобрений в этом опыте урожайность снижалась до 14.1 ц/га. Насыщение севооборота дозами N40–80P30 давало предельные прибавки урожайности пшеницы при последовательном увеличении доз азота на N40 7.2 и 3.5 ц/га, третья доза была неэффективна. Учитывая, что прибавка от 2-й дозы азота снижалась по сравнению с 1-й в 2.6–3.1 раза. Для рекомендаций производственной практике можно считать приемлемыми дозы N40–50–60 без фосфора для 2- и 3-й культур после пара и бессменно возделываемой пшеницы.

5. Азотное удобрение, повышая урожайность пшеницы, положительно влияло и на качество зерна. В опыте 3 без удобрения 3-й класс качества зерна пшеницы по величине содержания клейковины у 1-й культуры после пара отмечен в 85% лет, при внесении N40P30 – 92.5%. Следующие дозы вносили несущественные изменения. У 2- и 3-й пшеницы после пара на не удобряемых фонах 3-й класс качества отмечен реже – в 62.5 и 47.5% лет. С применением N40P30 повторяемость получения 3-го класса качества повышалась до 77.5 и 87.5% лет, с внесением N80P30 – до 92.5 и 95% лет. Повышение дозы до N120 вносило небольшие изменения – до 97.5 и 100% лет. В посевах неубоженной бессменной пшеницы частота получения 3-го класса качества снижалась до 42.5% лет, повышаясь за счет 1-й дозы до 67.5%, а на фонах N80–120 – до 92.5–97.5% лет. Учитывая подорожание удобрений, в условиях северо-запада Курганской обл. в зернопаровом севообороте для существенного роста частоты выращивания ценной пшеницы достаточно доз N15–20P15 в 1-м посевах после пара, в остальных полях – N40–50 в сочетании с P15 при посеве или без внесения фосфора. Недостаток высокобелкового зерна можно компенсировать использованием повышенных доз азота на небольших участках для выращивания сильной пшеницы и ее подмешивания к партиям слабой.

6. При экономической оценке результатов опыта 3 затраты на внесение N40P30 в 1-м поле после пара оказались почти равными стоимости общей прибавки 3.4 ц/га при отрицательной рентабельности. В следующем поле после пара расходы на удобрение в дозах N40–80P30 возрастали до 9595

и 12 310 руб./га, они хорошо окупались в посевах 3-й пшеницы после пара в варианте N40P30 благодаря прибавке урожая 11 ц/га. В посевах бессменной пшеницы фон N40P30 дал эффект, близкий к нулевому, и невысокую прибыль 609 руб./га при внесении N80P30. При повышенном содержании в почве подвижного  $P_2O_5$  (74 мг/кг) следует вносить одно азотное удобрение в дозе N40–50 с предполагаемой рентабельностью  $\approx 70\%$ .

7. Решение о необходимости применения фосфорного удобрения всецело определяется величиной содержания подвижного фосфора в почве. При его содержании как в Шадринском эксперименте, равным 74 мг/кг, фосфор можно не применять, но со снижением этого показателя до 20–40–50 мг/кг внесение фосфорного удобрения в любых севооборотах обязательно в дозах P15–20–30 в рядки при посеве. Выбор дозы зависит не только от содержания в почве подвижного  $P_2O_5$ , но и от уровня формируемых урожаев.

8. В опыте 4 в бессменном посевах пшеницы после стерневого фона при содержании  $P_2O_5$  в почве, не превышающем 40 мг/кг, как и в опыте 2, азотно-фосфорное удобрение имело преимущество перед внесением одного азота. Применение P20 при росте дозы азота становилось эффективнее, увеличивая прибавку от фосфора на фоне 3-х доз азота с 1.6 до 3.2 и 4.2 ц/га. Окупаемость азотно-фосфорного удобрения в вариантах N20–40–60P20 общим приростом урожая составила 8.5, 9.3, 8.0 кг/кг соответственно. Оплата азота предельными прибавками в указанных вариантах снижалась от 17 до 11 и 4 кг/кг. Наиболее экономически выгодными для повышения урожая пшеницы оказались дозы удобрений N20–40P20. В отношении надежного получения зерна 3-го класса качества вариант с меньшей дозой азота не давал положительного результата, в этом случае доза расходовалась в основном на увеличение урожайности. Удвоение и утроение дозы азота в сочетании с P20 обеспечивало частоту получения зерна 3-го класса качества в 65–74% лет.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Косякин П.А., Боронтов О.К., Путилина Л.Н., Магнаенкова Е.Н.* Содержание питательных элементов в черноземе выщелоченном в зависимости от агротехнических и погодных условий возделывания сахарной свеклы в ЦЧР // *Агрохимия*. 2022. № 5. С. 21–29.
2. *Шафран С.А.* Вклад минеральных удобрений в формирование урожайности полевых культур (сообщ. 2). Фосфорные и калийные удобрения // *Агрохимия*. 2021. № 8. С. 9–16.
3. *Попелнухина К.В.* Разработка системы минеральных удобрений в проектировании адаптивно-

- ландшафтной системы удобрений ФГБНУ “Белгородский НИИСХ”: Магистер. дис. Белгород, 2016. 83 с.
4. Чуюн О.Г., Черкасов Г.Н., Масютенко Н.П. Методика проектирования системы удобрений в адаптивно-ландшафтном земледелии. Курск: ГНУ ВНИИЗ и ЗПЭ РАСХН, 2008. 64 с.
  5. Еремин Д.И., Кибук Ю.П. Дифференцированное внесение удобрений, как инновационный подход в системе точного земледелия // Вестн. КрасГАУ. 2017. № 8. С. 1–10.
  6. Афанасьев Р.А., Мерзлая Г.Е. Содержание подвижного фосфора в почвах при длительном применении удобрений // Агрохимия. 2013. № 2. С. 30–36.
  7. Крючков А.Г., Елисеев В.И., Абдрашитов Р.Р. Динамика содержания подвижного фосфора в черноземе обыкновенном под посевом яровой твердой пшеницы в длительном стационарном опыте // Агрохимия. 2013. № 3. С. 32–35.
  8. Чекмарев П.А., Лукин С.В. Мониторинг плодородия пахотных почв Центрально-Черноземных областей России // Агрохимия. 2013. № 4. С. 11–22.
  9. Шафран С.А., Кирпичников Н.А., Ермаков А.А., Семенова А.И. Динамика содержания подвижного фосфора в почвах Нечерноземной зоны и его регулирование // Агрохимия. 2021. № 5. С. 14–20.
  10. Корнейко Н.И. Агрохимическое состояние пахотных почв Белгородской области // Усп. совр. естествознания. 2014. № 9(2). С. 120–124.
  11. Волынкина О.В., Кириллова Е.В. Формирование агрофона с оптимальным содержанием подвижного фосфора в черноземе выщелоченном // Агрохимия. 2021. № 1. С. 8–11.
  12. Дженсен Х.Р., Уильямс М.С. Экономика применения удобрений. Удобрения. М.: Колос, 1965. С. 41–68.
  13. Методическое руководство по проектированию применения удобрений в технологиях адаптивно-ландшафтного земледелия / Под ред. А.Л. Иванова, Л.М. Державина. М.: Минсельхоз РФ, РАСХН, 2008. 392 с.
  14. Системы удобрения в агротехнологиях Зауралья / Под ред. О.В. Волынкиной. О.В. Волынкина, В.И. Волынкин, Е.В. Кириллова, А.Н. Копылова, Д.В. Лысухина. Куртамыш: ООО “Куртамышская типография”, 2017. 284 с.

## Yield of Spring Wheat and Grain Quality with the Effective Use of Mineral Fertilization

O. V. Volynkina<sup>#</sup>

*Ural Federal Agrarian Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,  
ul. Belinskogo 112a, Yekaterinburg 620142, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: kniish@ketovo.zaural.ru*

The generalization of the results of 4 field experiments, the agrochemical and agrotechnical characteristics of which differed significantly, showed general and marginal increases in crop yields when using mineral fertilizers. The experiments were carried out in different soil and climatic zones of the Kurgan region: on heavy loamy ordinary chernozem in one of the farms of the Almenevsky district and on 2 experimental fields of the Kurgan Research Institute – Central (on medium loamy leached chernozem) and Shadrinsky (on heavy loamy leached chernozem). Type of tillage: in 3 experiments – plowing and crop rotation, in 4<sup>th</sup> – permanent wheat on a stubble background. Phosphorus fertilizer gave high yield increases on backgrounds with a content of mobile P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in a layer of 0–20 cm of soil from 30 to 50 mg/kg, with a content of 74 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/kg it had little effect. When testing doses of nitrogen and phosphorus, their first level provided the largest and best-paid marginal increase in comparison with the increments from the following doses of fertilizer. The fertilizer had a positive effect on wheat yield and grain protein content. The achievement of the 3<sup>rd</sup> grade of grain quality was attributed to 60–90% of the years in the experimental versions with 40–50% of the years in the control. It can be quite definitely concluded that on backgrounds with a soil content of 74 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/kg, only nitrogen fertilizer should be used; the nitrogen dose should be reduced to N40–50, the phosphorus dose to P15–20 using a near-sowing method of applying phosphorus fertilizer. Under these conditions, the profitability of the fertilizer increased to 45–73% compared with low and negative indicators in other variants.

*Keywords:* fertilizer efficiency, crop cultivation technology, crop rotation, marginal fertilizer gain, profitability.

УДК 631.816:633.521:631.582

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ МИНЕРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УДОБРЕНИЯ С РАЗНОЙ НАСЫЩЕННОСТЬЮ В ЗВЕНЕ ЛЬНЯНОГО СЕВООБОРОТА<sup>§</sup>

© 2024 г. Н. Н. Кузьменко\*

Федеральный научный центр лубяных культур  
170041 Тверь, Комсомольский просп., 17/56, Россия

\*E-mail: kuzmenko.nataliya2010@mail.ru

В звене льняного севооборота (чистый пар—озимая рожь—многолетние травы 1-го года пользования (г.п.)—многолетние травы 2-го г.п.—лен-долгунец) на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в условиях Нечерноземной зоны РФ в 2019–2023 гг. изучили эффективность минеральной системы удобрения с разной насыщенностью 1 га севооборотной площади. Показано, что наибольшую урожайность озимой ржи 26.9 ц/га получили при применении удобрений в дозе N80P60K90, что соответствовало варианту внесения 140 кг д.в. NPK/га севооборотной площади. Оптимальной дозой удобрений для многолетних трав 1-го и 2-го г.п. было применение N10P40K60, что обеспечило урожайность сена 38.6 и 52.0 ц/га соответственно. Для льна-долгунца оптимальной дозой было внесение N20P50K90, что позволило получить наибольшую урожайность льносоломы 43.5 и льносемян 5.3 ц/га. Повышение дозы удобрений под многолетние травы не обеспечило достоверного роста урожайности, под лен-долгунец — привело к снижению семенной продуктивности. Для многолетних трав и льна-долгунца достаточным было внесение 120 кг д.в. NPK/га севооборотной площади. Оптимальной насыщенностью для звена севооборота характеризовалась доза 120 кг д.в. NPK/га севооборотной площади. Продуктивность звена севооборота составила 25.8 ц з.е./га, окупаемость 1 кг NPK — 10.7 кг з.е. На почве с высоким содержанием подвижного фосфора, повышенным и высоким калия повышение насыщенности звена севооборота удобрениями до 140 кг д.в. NPK/га севооборотной площади не обеспечивало существенного роста продуктивности и приводило к снижению окупаемости удобрений прибавками урожая.

*Ключевые слова:* звено льняного севооборота, насыщенность удобрениями, доза, урожайность.

DOI: 10.31857/S0002188124080054, EDN: CDYFKS

### ВВЕДЕНИЕ

Как показывает накопленный опыт, к числу важнейших мер по увеличению урожайности сельскохозяйственных культур и повышения окупаемости удобрений прибавками урожая, а также эффективного использования достигнутого потенциала почвенного плодородия, относится разработка научно обоснованных систем удобрения. При разработке системы удобрения в льняном севообороте важно определить оптимальную насыщенность севооборота удобрениями, обеспечивающую получение высоких урожаев всех культур севооборота, в т.ч. и льна-долгунца. Лен в силу своих биологических особенностей требует создания благоприятных условий почвенного питания заблаговременно

за счет целенаправленной системы удобрения в севообороте [1, 2].

Для льняного севооборота предпочтительнее применение органо-минеральной системы удобрения, которая обеспечивает сохранение плодородия почвы в течение длительного времени, наиболее благоприятные агрохимические показатели и стабильно высокую продуктивность севооборота и льна-долгунца [3]. Однако в связи с резким снижением объемов применения традиционных органических удобрений из-за несостоятельности сельхозпроизводителей применение органической и органо-минеральной систем удобрения в последнее время значительно сократилось [4]. Большинство предприятий применяют только минеральные удобрения. В связи с постоянно меняющимися условиями ведения сельскохозяйственного производства вопросы применения минеральных удобрений и их дозы в севооборотах в различных почвенно-климатических условиях требуют уточнения [5, 6].

<sup>§</sup> Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания Федерального научно-го центра лубяных культур по теме № FGSS-2024-005.

Цель работы – изучить эффективность минеральной системы удобрения с разной насыщенностью в звене льняного севооборота.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено в стационарном опыте ФНЦ ЛК ОП НИИЛ на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в 2019–2023 гг. в Нечерноземной зоне в условиях Тверской обл. Эффективность минеральной системы удобрения изучали в звене 7-польного льняного севооборота. Чередование культур в звене следующее: пар чистый–озимая рожь с подсевом многолетних трав (клевер с тимофеевкой)–многолетние травы 1-го года пользования (г.п.)–многолетние травы 2-го г.п.–лен-долгунец. В данной работе рассмотрены варианты минеральной системы удобрения с разной насыщенностью, в качестве контроля – вариант без внесения удобрений. В опыте использовали  $N_{aa}$ ,  $P_c$  состава №6: P26 и  $K_x$  (табл. 1).

Почва в начале ротации (2019 г.) в варианте без применения удобрений характеризовалась следующими агрохимическими показателями:  $pH_{KCl}$  4.4 ед., содержание  $P_2O$  (по Кирсанову) – 88,  $K_2O$  – 54 мг/кг, содержание гумуса (по Тюрину) – 1.05%. В вариантах с применением минеральной системы удобрения показатели были близкими и находились в пределах соответственно 4.4–4.6 ед., 158–177, 151–174 мг/кг и 1.19–1.27%.

Опыт заложен методом рендомизированного размещения вариантов. Повторность опыта трехкратная, площадь опытной делянки составляла 72, учетной 36 м<sup>2</sup>.

Возделывание культур в севообороте проводили в соответствии с их биологическими особенностями согласно рекомендованной для данной зоны технологии возделывания. Технологические процессы по выращиванию и уборке осуществляли с максимальным использованием серийных машин и оборудования. В опыте возделывали озимую рожь сорта Дымка, клевер красный сорта

Макаровский местный + тимофеевка сорта Нарынская, лен-долгунец сорта Тонус.

Учеты, наблюдения и исследования в опыте проводили согласно методическим указаниями [7, 8] и ГОСТ 26204-84 – ГОСТ 26213-84 [9].

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Разная степень насыщенности севооборота удобрениями оказывала существенное влияние на рост, развитие и формирование урожайности возделываемых в звене севооборота сельскохозяйственных культур. Известно, что для зерновых культур важным элементом структуры урожая является продуктивность колоса. Результаты исследования на озимой ржи показали, что в варианте без применения удобрений сформировался самый мелкий колос – 5.6 см с меньшим количеством зерен в нем – 29.6 шт. Урожайность зерна озимой ржи составила всего 11.1 ц/га. Применение минеральных удобрений обеспечило повышение данных показателей в среднем на 2.9 см и 15.7 шт. и достоверную прибавку урожайности зерна в среднем на 12.1 ц/га ( $HCP_{05} = 6.0$ ). При повышении дозы удобрения под озимую рожь с N30P40K60 до N80P60K90 различия урожайности также были существенными – 6.7 ц/га. Самый крупный колос – 8.8 см с количеством зерен в нем 47.3 шт., наиболее высокую продуктивную кустистость 1.9 ед. и урожайность зерна 26.9 ц/га получили при применении под озимую рожь удобрений в дозе N80P60K90, что соответствовало варианту 140 кг д.в. NPK/га севооборотной площади (табл. 2).

При возделывании многолетних трав, содержащих в составе клевер красный, который очень чувствителен к реакции почвенной среды на кислой дерново-подзолистой почве ( $pH_{KCl}$  4.4–4.6 ед.), отмечали низкую долю клевера в составе травосмеси, особенно на 2-й год пользования – от 17 до 28%. В варианте без применения удобрений была велика доля разнотравья – 55 и 59% и низкая доля тимофеевки – 12 и 13% соответственно. Между удобренными вариантами какой-либо закономерности изменения ботанического состава трав отмечено не было. Урожайность

**Таблица 1.** Дозы удобрений под культуры в звене льняного севооборота

Вариант	Внесено под культуры NPK, кг д.в./га				Внесено NPK за звено севооборота, кг д.в./га	Внесено в сумме NPK, кг д.в./га севооборотной площади
	озимая рожь	многолетние травы 1-го г.п.	многолетние травы 2-го г.п.	лен- долгунец		
1. Без удобрения	0–0–0	0–0–0	0–0–0	0–0–0	0–0–0	0
2. (NPK)80	30–40–60	10–30–40	10–30–40	20–40–60	70–140–200	80
3. (NPK)120	60–60–90	10–40–60	10–40–60	20–50–90	100–190–300	120
4. (NPK)140	80–60–90	10–50–90	10–50–90	30–60–100	130–220–370	140

**Таблица 2.** Влияние удобрений на формирование урожайности озимой ржи (2020 г.)

Вариант	Длина колоса, см	Количество зерен в колосе, шт.	Продуктивная кустистость, ед.	Урожайность зерна, ц/га
1. Без удобрения	5.6	29.6	1.4	11.1
2. (NPK)80	8.4	45.2	1.4	20.2
3. (NPK)120	8.3	43.4	1.5	22.4
4. (NPK)140	8.8	47.3	1.9	26.9
<i>HCP</i> <sub>05</sub>				6.0

**Таблица 3.** Влияние систем удобрения на ботанический состав и урожайность сена многолетних трав (2021–2022 гг.)

Вариант	Доля в составе травосмеси, %			Урожайность, ц/га
	клевер	тимофеевка	разнотравье	
Многолетние травы 1-го г.п.				
1. Без удобрения	32	12	55	18.0
2. (NPK)80	36	38	26	32.0
3. (NPK)120	32	34	34	38.6
4. (NPK)140	37	39	24	42.2
<i>HCP</i> <sub>05</sub>				6.6
Многолетние травы 2-го г.п.				
1. Без удобрения	28	13	59	23.4
2. (NPK)80	28	35	37	46.9
3. (NPK)120	18	36	46	52.0
4. (NPK)140	17	38	45	53.6
<i>HCP</i> <sub>05</sub>				11

**Таблица 4.** Влияние удобрений на динамику роста и формирование воздушно-сухой массы льна-долгунца, 2023 г.

Вариант	Высота, см			Воздушно-сухая масса, г/100 растений		
	“елочка”	начало бутонизации	цветение	“елочка”	начало бутонизации	цветение
1. Без удобрения	5.9	26.4	50.9	2.7	10.3	18.1
2. (NPK)80	10.8	40.0	59.5	5.3	18.4	33.5
3. (NPK)120	10.8	42.6	66.8	5.4	22.8	47.9
4. (NPK)140	10.6	38.4	63.1	5.7	17.3	42.8

сена многолетних трав при применении удобрений в оба года была существенно больше в сравнении с вариантом без удобрения – на 19.6 и 27.4 ц/га (при *HCP*<sub>05</sub> = 6.6 и 10.9 ц/га). Достоверную прибавку урожая сена в размере 6.6 ц/га получили только для многолетних трав 1-го г.п. при повышении дозы удобрений с N10P30K40 до N10P40K60, что соответствовало варианту 80 и 120 кг д.в. NPK/га севооборотной площади (табл. 3).

Лен-долгунец дает одновременно 2 вида продукции: волокно и семена. Основная продукция – льняное волокно формируется в вегетативном органе – стебле, поэтому для льна-долгунца высота растений является важным показателем. Показали,

что наиболее интенсивным ростом с большей воздушно-сухой массой во 2-й половине вегетации отличались растения льна при внесении удобрений в дозе N20P50K90, что соответствовало варианту с насыщенностью 120 кг д.в. NPK/га севооборотной площади (табл. 4).

В этом же варианте получена наибольшая урожайность льносоломки и льносемян – 43.5 и 5.3 ц/га. С повышением дозы удобрений под лен-долгунец до N30P60K100 на легкосуглинистой почве с высоким содержанием фосфора и повышенным калия отмечали тенденцию к снижению урожайности соломки на 4.3 ц/га и достоверное снижение семенной продуктивности на 0.4 ц/га. В среднем урожайность

**Таблица 5.** Урожайность льна-долгунца (2023 г.) и эффективность минеральной системы удобрения в звене севооборота (2019–2023 гг.)

Вариант	Урожайность, ц/га		Среднегодовая продуктивность звена севооборота, ц з.е./га	Окупаемость 1 кг NPK, кг з.е.
	солома	семена		
1. Без удобрения	23.6	3.8	13.0	–
2. (NPK)80	36.7	4.4	22.3	11.6
3. (NPK)120	43.5	5.3	25.8	10.7
4. (NPK)140	39.2	4.9	26.8	9.8
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	11	0.4	2.0	

льнопродукции с повышением дозы удобрений с N20P50K90 до N30P60K100 снизилась на 8.7%.

Среднегодовая продуктивность звена севооборота при применении удобрений в сравнении с не-удобренным вариантом в среднем увеличилась почти в 2 раза – на 12.0 ц з.е./га. С увеличением насыщенности с 80 до 120 кг д.в. NPK/га севооборотной площади продуктивность повысилась на 3.5 ц з.е./га, с 120 до 140 кг д.в. NPK/га севооборотной площади – только на 1.0 ц з.е./га. Окупаемость удобрений при этом снизилась с 10.7 до 9.8 кг (табл. 5).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в стационарном опыте на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве в звене льняного севооборота (чистый пар – озимая рожь–многолетние травы 1-го г.п.–многолетние травы 2-го г.п.–лен-долгунец) показано, что для озимой ржи оптимальной дозой удобрений, обеспечившей наибольшую урожайность зерна 26.9 ц/га, было внесение N80P60K90, что соответствовало варианту с дозой 140 кг д.в. NPK/га севооборотной площади. Оптимальной дозой удобрений для многолетних трав 1-го и 2-го г.п. было применение N10P40K60, что позволило получить урожайность сена 38.6 и 52.0 ц/га соответственно. Повышение дозы удобрений до N10P50K90 не обеспечило достоверного роста урожайности многолетних трав. Наибольшую урожайность льносоломы 43.5 и льносемян 5.3 ц/га получили при внесении под лен удобрений в дозе N20P50K90. Повышение дозы удобрений под лен до N30P60K100 приводило к достоверному снижению семенной продуктивности. Для многолетних трав и льна-долгунца достаточным было внесение 120 кг д.в. NPK /га севооборотной площади.

Оптимальной насыщенностью звена севооборота при минеральной системе удобрения было 120 кг д.в. NPK/га севооборотной площади. Продуктивность звена севооборота составила 25.8 ц з.е./га, окупаемость 1 кг NPK – 10.7 кг з.е. Повышение насыщенности удобрениями до 140 кг д.в. NPK/га севооборотной

площади на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве с низким содержанием органического вещества не обеспечивало существенного роста продуктивности и приводило к снижению окупаемости удобрений прибавками урожая.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прудников А.Д., Рыбченко Т.И., Романова И.Н. Адаптивное льноводство: монограф. / Под ред. А.В. Кучумова. Смоленск: Универсум, 2016. 216 с.
2. Дмитриевская И.И., Степанова Д.С., Белопухов С.Л., Раскатов В.А. Влияние длительного применения удобрений на урожайность льна-долгунца и качество волокна // Достиж. науки и техн. АПК. 2015. Т. 29. № 10. С. 50–52.
3. Кузьменко Н.Н. Влияние насыщенности севооборота органическими и минеральными удобрениями на показатели плодородия, урожайность и качество льнопродукции // Плодородие. 2022. № 1(124). С. 29–32. DOI: 10.25680/S19948603.2022.124.08
4. Чекмарев П.А. Состояние плодородия почв и мероприятия по его повышению в 2012 г. // Агротех. вестн. 2012. № 1. С. 2–4.
5. Кузьменко Н.Н. Влияние различных уровней удобрений на урожайность льна-долгунца и культур льняного севооборота // Агротехимия. 2022. № 8. С. 17–21. DOI: 10.31857/S0002188122080105
6. Сорокина О.Ю. Анализ изменения оптимальных доз минеральных удобрений под лен-долгунец // Агротех. вестн. 2014. № 3. С. 16–19.
7. Методические указания по проведению полевых опытов со льном-долгунцом. Торжок, 1978. 71 с.
8. Методические указания по проведению исследований в длительных опытах с удобрениями. Ч. 1. Особенности закладки и проведения длительных опытов в различных условиях. М.: ВИУА, 1986. 146 с.
9. ГОСТ 26204-84 – ГОСТ 26213-84. Почвы. Методы анализа. М.: Изд-во стандартов, 1984. 54 с.

## Effectiveness of the Mineral Fertilizer System with Different Saturation in the Link of the Flax Crop Rotation

N. N. Kuzmenko<sup>#</sup>

*Federal Scientific Center of Bast-Fiber Crops Breeding,  
Komsomolskiy prosp. 17/56, Tver 170041, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: kuzmenko.nataliya2010@mail.ru*

In the link of flax crop rotation (fallow land–winter rye–perennial grasses of the 1st year of use (y.u.)–perennial grasses of the 2nd y.u.–fiber flax) on sod-podzolic light loamy soil in the conditions of the Non-Chernozem zone of the Russian Federation in 2019–2023 the effectiveness of a mineral fertilizer system with different saturation of 1 ha of crop rotation was studied squares. It is shown that the highest yield of winter rye of 26.9 c/ha was obtained when applying fertilizers at a dose of N80P60K90, which corresponded to the option of applying 140 kg of active substance (a.s.) NPK/ha of crop rotation area. The optimal dose of fertilizers for perennial grasses of the 1st and 2nd y.u. was the use of N10P40K60, which provided hay yields of 38.6 and 52.0 c/ha, respectively. For fiber flax, the optimal dose was the introduction of N20P50K90, which made it possible to obtain the highest yield of flax straw 43.5 and flax seeds 5.3 c/ha. An increase in the dose of fertilizers for perennial grasses did not provide a reliable increase in yield, for fiber flax – led to a decrease in seed productivity. For perennial grasses and flax, it was sufficient to add 120 kg of a.s. NPK/ha of crop rotation area. The optimal saturation for the crop rotation link was characterized by a dose of 120 kg a.s. NPK/ha of crop rotation area. The productivity of the crop rotation link was 25.8 grain unit (g.u.)/ha, the payback of 1 kg of NPK was 10.7 kg g.u. On soil with a high content of mobile phosphorus, elevated and high potassium, an increase in the saturation of the crop rotation link with fertilizers up to 140 kg a.s. NPK/ha of the crop area did not provide a significant increase in productivity and led to a decrease in the payback of fertilizers with crop additions.

*Keywords:* flax crop rotation link, fertilizer saturation, dose, yield.

УДК 631.559:633.521:631.811

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОДУКТИВНОСТЬЮ ЛЬНА-ДОЛГУНЦА ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ МИНЕРАЛЬНОГО ПИТАНИЯ<sup>§</sup>

© 2024 г. О. Ю. Сорокина\*

Федеральный научный центр лубяных культур  
170041 Тверь, Комсомольский просп., 17/56, Россия

\*E-mail: olga-sorokina@bk.ru

В Тверской обл. на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве изучили управление продуктивностью разных по срокам созревания сортов льна-долгунца (Зарянка и Дипломат) путем оптимизации их минерального питания. Для расчета дозы минерального питания использовали 3 способа: балансовый, модифицированный Каюмовым, балансовый на компенсацию выноса и по соотношению элементов в удобрении. Соответственно дозы составили N0P0K0 (контроль), N30P0K50, N30P22K80, N30P60K150. Установлено, что несмотря на различные погодные условия, применение удобрений с начальных фаз роста растений льна позволило растениям накапливать бóльшую биомассу: в засушливых условиях в среднем для сортов больше на 58%, в оптимальных условиях водообеспечения – на 45%. Поглощение элементов питания растениями льна-долгунца возрастало с увеличением дозы внесенных элементов. При равной дозе азота в удобрении его количество было больше как в корнях, так и стеблях льна, при увеличении доз фосфора и калия в удобрении. Содержание азота, фосфора и калия в корнях льна позднеспелого сорта Дипломат было больше, чем раннеспелого Зарянка. При оптимизации питания за счет внесения удобрений в дозах N30P22K80 и N30P60K150 доля стеблей в структуре растений льна увеличивалась и составляла у сорта Зарянка 45 и 46%, у сорта Дипломат – 44 и 49% соответственно дозам. Без удобрений доля стебля составила 38%, а доля корней и листьев была самая высокой – 22 и 42%. Продукционный процесс в этом случае был менее рациональный. Позднеспелый сорт Дипломат в среднем за 3 года при внесении всех доз удобрений имел урожайность льносоломой больше на 3.1–3.9 ц/га, чем раннеспелый сорт Зарянка. У раннеспелого сорта Зарянка более высокая доза удобрений N30P60K150 снижала показатели качества: номер длинного волокна и процентнономер всего волокна, особенно в засушливый вегетационный период.

**Ключевые слова:** лен-долгунец (*Linum usitatissimum*), минеральные удобрения, дозы NPK, продуктивность, сорт.

**DOI:** 10.31857/S0002188124080067, **EDN:** CDWWLL

### ВВЕДЕНИЕ

В условиях интенсификации сельскохозяйственного производства важнейшей задачей является создание оптимальной системы питания растений, обеспечивающей полную реализацию генетического потенциала сорта с получением максимально возможного урожая с хорошим качеством продукции. Для решения данной задачи следует определиться с дозой удобрений и оптимальным соотношением элементов в них при возделывании льна. Величина дозы зависит от многих факторов: вида предшественника и степени его удобренности, погодных условий периода

вегетации, гранулометрического состава и агрохимических показателей почвы, особенностей возделываемого сорта, планируемой урожайности. Нерациональным применением удобрений можно реально снизить качество волокна льна [1].

При выборе доз минеральных удобрений необходимо нацеливаться на получение не только наибольшей прибавки урожайности, но и высокой окупаемости затрат на их применение [2]. Например, на светло-серой лесной почве применение полного минерального удобрения N45P90K90 позволило получить не только максимальную урожайность льносоломой, но и способствовало увеличению общего выхода волокна (на 5%) и длинного (на 15%) [3]. Исследования на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве с низким содержанием гумуса с новым сортом льна-долгунца Феникс показали, что применение (NPK)48–64 позволило получить

<sup>§</sup> Работа выполнена в рамках госзадания ФГБНУ ФНЦ ЛК по теме № FGSS-2024-005 при поддержке Минобрнауки России.

высокий урожай продукции. Увеличение дозы удобрения приводило к снижению прочности и гибкости волокна [4]. На дерново-подзолистой среднесуглинистой почве при возделывании льна сорта Сурский наибольшую урожайность всего и длинного волокна (2.33 и 2.16 т/га соответственно) и высокое качество стланцевой тресты 2.8 номера обеспечило сочетание 24 млн всхожих семян/га с дозой удобрения N15P30K60 [5].

Современные сорта имеют более высокое содержание волокна в стебле – 30–35% против 20–23% у старых сортов, что требует оптимизации дозы минерального удобрения, чтобы не вызвать полегание посева [6, 7]. Сортвые особенности влияют на структуру урожая. Наиболее существенно отличаются раннеспелые и позднеспелые сорта [8]. Взаимосвязь между реакцией сорта на высокий фон удобрений и скороспелостью отмечали ряд авторов [9, 10]. Оптимизация минерального питания способствует лучшей направленности продукционного процесса, выраженного в накоплении растениями льна полноценной хозяйственно ценной части урожая – волокна [11].

Цель работы – выявить оптимальные условия минерального питания различных по срокам созревания сортов льна-долгунца для получения высокой продуктивности культуры и качественной льнопродукции.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в Тверской обл. на дерново-подзолистой легкосуглинистой на моренном карбонатном суглинке почве. Содержание гумуса в пахотном слое – 1.3%, подвижных фосфора и калия (по Кирсанову) – 217–222 и 86–100 мг/кг соответственно,  $pH_{KCl}$  5.2 ед. [12].

Для изучения влияния питания на продукционный процесс разных по срокам созревания сортов льна-долгунца использовали дозы удобрений, рассчитанные разными методами:

1 – балансовый метод на запланированный урожай льносоломы (с учетом побочной) 40 ц/га по формуле, предложенной ВИУА и модифицированной Каюмовым [13]. Вынос питательных веществ 1 ц основной продукции и соответствующей ей побочной, кг:  $P_2O_5$  – 0.55,  $K_2O$  – 1.97, N – 1.3 [14, с. 34]. При повышенном содержании фосфора (в нашем случае от 217 до 222 мг/кг) по этому способу расчета внесение фосфора не требовалось. Доза азота при этом методе расчета составляла значительную величину (75–80 кг/га). Так как лен возделывают на легкосуглинистой почве и по данным многих опытов ОП НИИЛ и др. исследователей [15, 16] наибольшая доза азота для льна равна

30 кг/га. Соответственно, в этом варианте доза для внесения составила N30P0K50 (80 кг д.в./га);

2 – балансовый метод расчета доз фосфорных и калийных удобрений по методу компенсации их выноса урожаями:  $P_2O_5$  – на 100,  $K_2O$  – на 100% [15, с. 100]. Доза составила N30P22K80 (132 кг д.в./га);

3 – по соотношению элементов в удобрениях: N : P : K = 1 : 2 : 5, что соответствовало дозе N30P60K150 (240 кг д.в./га) [17, с. 122].

Исследования проводили с раннеспелым сортом Зарянка и позднеспелым Дипломат.

Наблюдения и исследования проводили в соответствии с [18]. Агротехника возделывания – общепринятая в данной зоне. Норма высева – 20 млн всхожих семян/га, способ посева – узкорядный. Площадь делянки 33 м<sup>2</sup>, повторность четырехкратная.

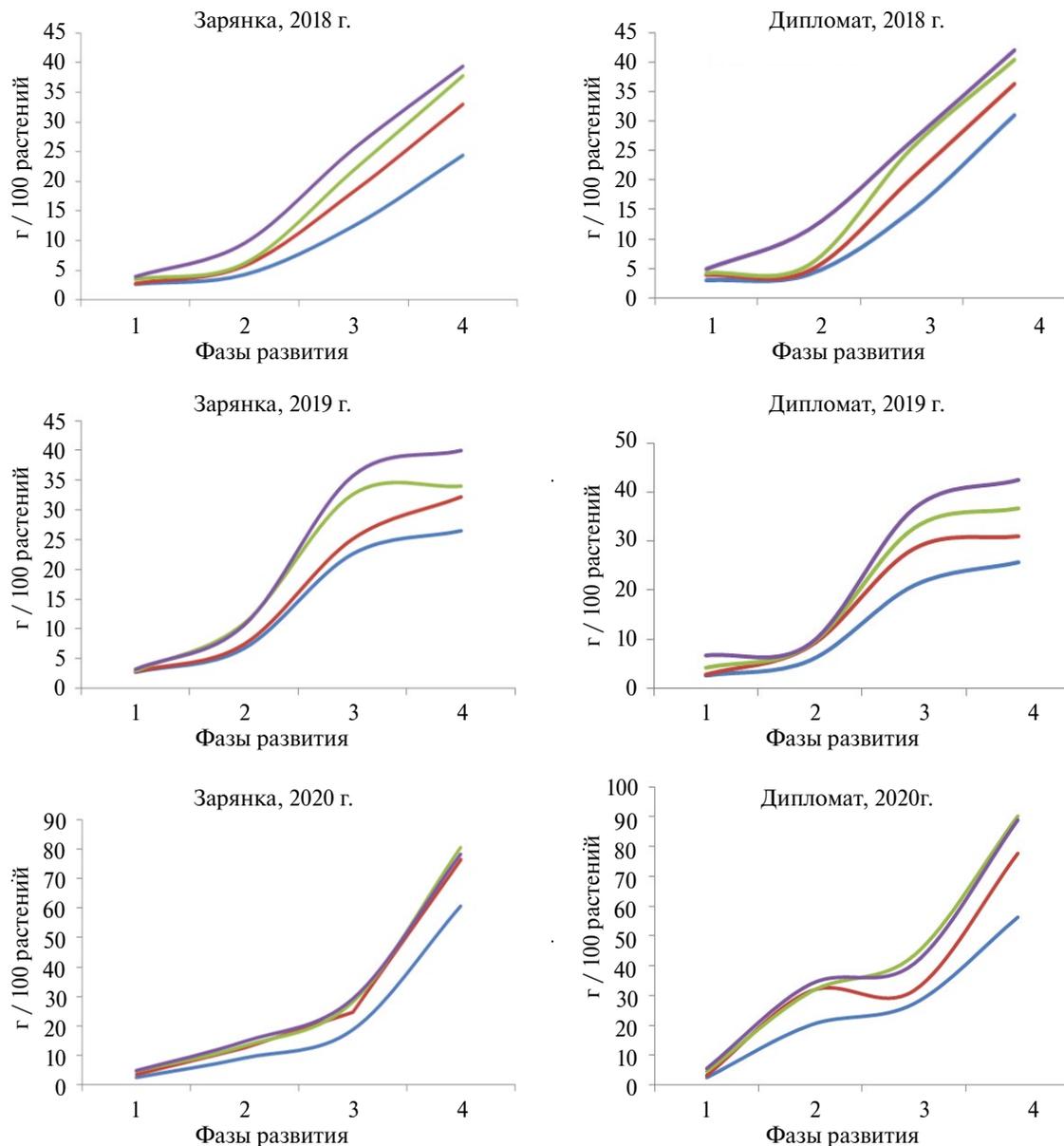
В растениях определяли содержание общего фосфора методом электроколориметрии, калия – методом пламенной фотометрии, азота – колориметрическим феноловым методом в модификации Кудеярова из одной навески после мокрого сжигания [18]. Учет урожайности осуществляли сплошным методом с каждой делянки с последующим пересчетом на стандартную влажность 19%, нормированную засоренность 5% [19]. Показатели качества волокна определяли по методике [20].

Экспериментальные данные обрабатывали методом дисперсионного анализа.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В продукционном процессе роль минеральных удобрений высока. С фазы развития “елочка” отметили преимущество применения полных минеральных удобрений в накоплении биомассы растениями как раннеспелого сорта Зарянка, так и позднеспелого сорта Дипломат. При графическом изображении данных прироста воздушно-сухой массы наблюдали, что кривые прироста по годам несколько отличались (рис. 1).

Гидротермические условия вегетационных периодов влияли на этот процесс. Например, в 2018 г. гидротермический коэффициент (ГТК) за вегетацию был равен 1.09. Фазы развития льна прошли в более короткий срок. Вегетационный период у раннеспелого сорта Зарянка составил 67 сут, у позднеспелого сорта Дипломат – 80 сут, и было накоплено воздушно-сухой массы 40 и 43 г/100 растений соответственно сортам в вариантах полного применения удобрений. В 2020 г. ГТК за этот период был равен 2.15, и продолжительность вегетации составила 83 и 90 сут соответственно сортам. Накопление воздушно-сухой массы к концу вегетации



**Рис. 1.** Накопление воздушно-сухой массы растениями льна-долгунца в фазах вегетации: 1 – “елочка”, 2 – бы- стрый рост, 3 – бутонизация, 4 – цветение.

было в 2 раза больше и составило 80 и 90 г/100 растений соответственно.

Увеличение массы растений как у сорта Зарянка, так и у сорта Дипломат, происходило с ростом дозы NPK до 240 кг д.в./га, начиная с фазы “елочка” и до окончания вегетации. Увеличение массы растений льна при применении дозы (NPK)132 в некоторые годы приближалось к накоплению биомассы в варианте применения более высокой дозы, но в среднем урожайность была меньше. В первых фазах развития растения льна в варианте без внесения фосфора наращивали меньшую

массу, чем в вариантах с внесением всех элементов. В более благоприятном вегетационном периоде (2020 г.), биомасса растений в варианте без фосфора приблизилась к варианту внесения полного удобрения у раннеспелого сорта Зарянка, а у позднеспелого сорта Дипломат прирост массы хотя и приближался на первых этапах к вариантам с полным внесением удобрений, но к цветению заметно был меньше (рис. 1). Оценка гидротермических условий (за 72 года) по величине коэффициента ГТК (оптимальный – от 1.0 до 2.0) за вегетационный период для льна-долгунца (май–август) показала,

**Таблица 1.** Влияние различных доз удобрений на поглощение и распределение элементов питания (NPK) в растениях льна (на 22-е сут после всходов, среднее за 3 года), мг/10 растений

Доза удобрений	Стебель				Корень				ΣNPK стебель + + корень
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	ΣNPK	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	ΣNPK	
	Сорт Зарянка								
Без удобрений	9.5	1.8	8.4	19.7	1.36	0.34	1.97	3.67	23.4
N30P0K50	13.4	2.4	12.6	28.4	1.72	0.43	2.68	4.83	33.2
N30P22K80	14.2	2.7	16.1	33.0	1.86	0.46	3.22	5.54	38.5
N30P60K150	16.0	3.3	19.8	39.1	2.04	0.53	4.07	6.64	45.7
Сорт Дипломат									
Без удобрений	9.4	1.86	8.7	20.0	1.40	0.36	2.28	4.04	24.0
N30P0K50	13.8	2.5	12.4	28.7	2.11	0.47	3.87	6.45	35.2
N30P22K80	14.1	2.77	16.2	33.0	1.95	0.51	3.41	5.87	38.9
N30P60K150	17.0	3.43	20.2	40.6	2.44	0.58	4.81	7.83	48.5

что благоприятными они бывают в 60% вегетационных периодов [21].

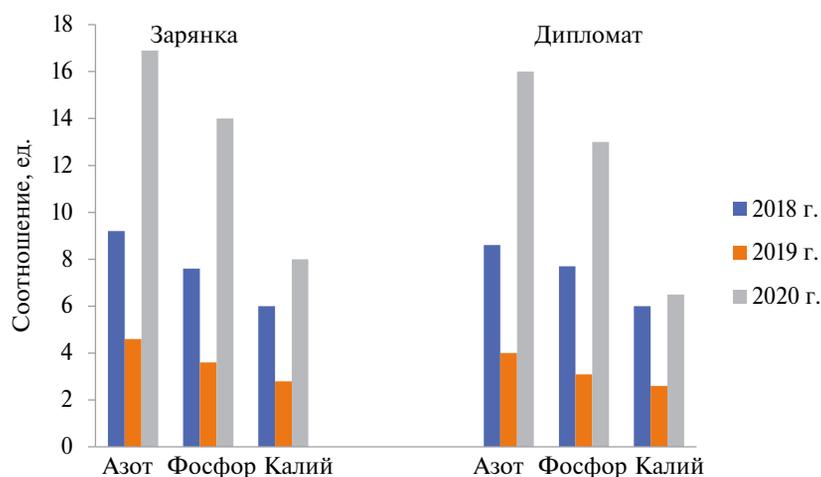
Применение различных доз минеральных удобрений повлияло на поглощение и распределение элементов питания в молодых растениях льна. В варианте без удобрений было отмечено значительно меньшее как суммарное поглощение, так и отдельных элементов. В варианте без фосфорных удобрений поступление фосфора как в стебли, так и в корни, было меньше, чем в вариантах с полным внесением элементов, но больше, чем в варианте без удобрений. Доза азота во всех вариантах применения удобрений была одинаковой, а поступление его в растения льна увеличивалось с увеличением дозы фосфора и калия.

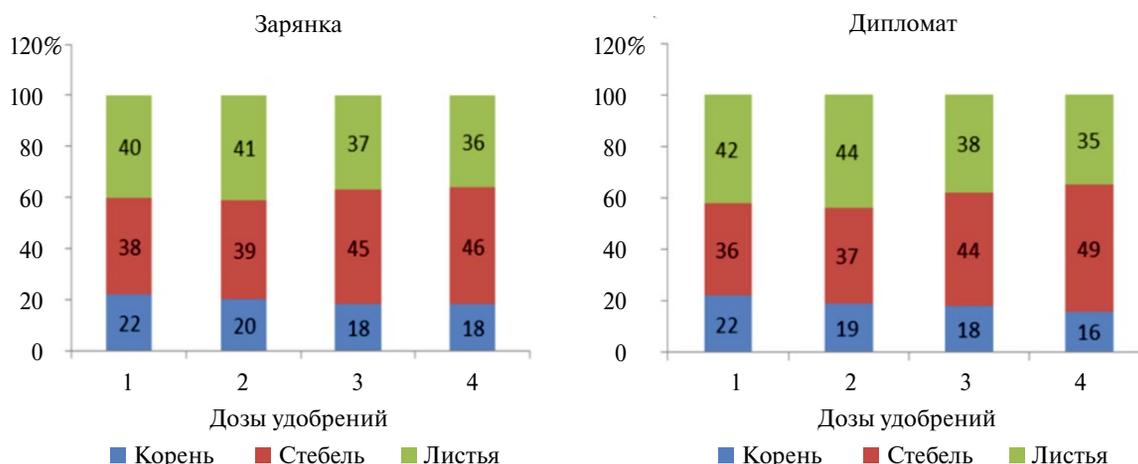
При поглощении калия растениями льна отмечена четкая закономерность. Чем больше была доза внесенного калия, тем больше было его

поглощение. Позднеспелый сорт Дипломат в корнях накапливал больше элементов питания, чем раннеспелый сорт Зарянка (табл. 1).

Перераспределение элементов из корня в стебель зависело от метеорологических условий периода вегетации и сорта. В 2020 г. элементы питания сразу переходили в стебель льна. Азота было в 16 раз больше в стебле, чем в корнях, фосфора – в 14 раз, калия – в 8 раз у сорта Зарянка. В 2019 г. соотношение содержания элементов в стебле и корне было минимальным (рис. 2).

Дозы удобрений, рассчитанных разными способами, повлияли на формирование структуры растений льна. Без применения удобрений растения льна, стремясь получить питание, увеличивали долю корней и листьев в ущерб стеблей – основной продукции, ради которой возделывают лен-долгунец. Например, в фазе развития “быстрый рост”

**Рис. 2.** Соотношение содержания элементов питания в стеблях и корнях растений льна-долгунца в зависимости от года и сорта (среднее в вариантах доз удобрений, на 22-е сут вегетации).



**Рис. 3.** Влияние дозы удобрения на соотношение корня : стебли : листья в структуре растений льна-долгунца в фазе быстрого роста, %. Варианты: 1 – без удобрений, 2 – без фосфора N30P0K50, 3 – N30P22K50 или (NPK)132, 4 – N30P60K150 или (NPK)240.

в варианте без применения удобрений доля корней и листьев в структуре растения была самой высокой – 22 и 40% (сорт Зарянка), 42% (сорт Дипломат) соответственно, а доля стеблей – самой низкой: 38% у сорта Зарянка и 36% у сорта Дипломат. Наибольшая доля стеблей у сорта Зарянка (45 и 46%) и у сорта Дипломат (44 и 49%) сформировалась при оптимизации питания за счет внесения удобрений в дозах N30P22K80 и N30P60K120 (рис. 3).

Продукционный процесс в этих вариантах был оптимальным для получения основной продукции льна-долгунца – стеблей (волокна).

Наиболее высокая урожайность льносоломки в среднем за 3 года была получена при применении

наибольшей дозы минерального удобрения при применении расчета по соотношению элементов питания в удобрении N : P : K = 1 : 2 : 5. В отдельные годы урожайность льносоломки в варианте расчета на компенсацию выноса (соотношение N : P : K = 1 : 0.7 : 3.6) была близкой (в пределах ошибки опыта). Позднеспелый сорт Дипломат в среднем за 3 года во всех вариантах удобрения имел урожайность льносоломки больше на 3.1–3.9 ц/га, чем раннеспелый сорт Зарянка. Урожайность льносемян в меньшей степени зависела от дозы удобрения и сорта, а больше от погодных условий в момент цветения и налива семян. При всех способах расчета доз удобрений в среднем за 3 года урожайность семян льна была больше

**Таблица 2.** Влияние различных доз удобрений на урожайность льна-долгунца, ц/га

Удобрения	2018 г.		2019 г.		2020 г.		Среднее за 3 года	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Сорт Зарянка								
Без удобрений	29.4	2.3	24.0	5.1	25.1	7.2	24.1	4.9
N30P0K50	28.5	2.6	31.0	7.9	29.5	7.7	29.7	6.1
N30P22K80	33.3	2.8	36.7	7.1	39.8	9.2	36.6	6.4
N30P60K150	38.0	1.8	39.6	8.1	40.7	9.7	39.4	6.5
HCP <sub>05</sub>	2.9	0.5	3.3	0.8	4.2	1.2		
Сорт Дипломат								
Без удобрений	28.0	2.1	22.2	6.5	24.9	6.3	25.0	5.0
N30P0K50	32.1	2.5	31.3	7.3	37.4	8.2	33.6	6.0
N30P22K80	36.5	2.0	38.9	7.7	43.6	9.0	39.7	6.2
N30P60K150	42.6	2.8	40.5	7.4	46.1	9.5	43.1	6.5
HCP <sub>05</sub>	3.2	0.6	4.1	0.7	4.0	0.8		

Примечание. В графе 1 – льносоломка, 2 – семена.

**Таблица 3.** Влияние удобрений на качество льносолумы (№ длинного волокна и проценто-номер всего волокна)

Вариант	№ длинного волокна				%№ всего волокна			
	2018 г.	2019 г.	2020 г.	среднее за 3 года	2018 г.	2019 г.	2020 г.	среднее за 3 года
Сорт Зарянка								
Без удобрений	8.7	10.4	9.3	9.5	147	205	169	174
N30P0K50	8.8	10.5	9.7	9.7	154	200	231	194
N30P22K80	9.9	9.6	10.5	10.0	182	178	263	208
N30P60K150	9.6	9.7	9.7	9.7	171	175	202	183
Сорт Дипломат								
Без удобрений	9.1	8.5	10.3	9.3	156	238	221	205
N30P0K50	9.3	8.8	10.5	9.5	232	214	232	226
N30P22K80	10.2	8.8	11.4	10.1	219	223	278	240
N30P60K150	10.7	9.5	11.2	10.5	232	229	261	241

контроля без удобрений на 1.2–1.6 ц/га у сорта Зарянка и на 1.0–1.5 ц/га у сорта Дипломат (табл. 2).

Технологическая оценка льняной соломы показала, что с увеличением продолжительности вегетационного периода до биологически обусловленного, когда элементы питания поступали более продолжительное время и более равномерно (как в 2020 г.), комплексный показатель качества льносолумы – проценто-номер (%№) всего волокна и номер длинного волокна (№) был больше, особенно у позднеспелого сорта Дипломат, у которого более высокая доза удобрений (N30P60K150) не снизила этот показатель. В среднем за 3 года более высокий комплексный показатель %№ всего волокна и номер длинного волокна у раннеспелого сорта Зарянка был отмечен при применении дозы N30P22K80. Более высокая доза удобрения N30P60K150 увеличивала урожайность льносолумы, но снижала показатели ее качества. У позднеспелого сорта Дипломат более высокая доза удобрения с широким соотношением элементов в нем позволяла получить наибольшую урожайность льносолумы с хорошим качеством (табл. 3).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что управление продуктивностью льна-долгунца путем оптимизации питания было эффективным. Несмотря на различные погодные условия, применение удобрений с начальных фаз роста растений льна позволило ему накапливать большую биомассу: в засушливый период вегетации в среднем для сортов – на 58, в оптимальных условиях водообеспечения – на 45% больше, чем в контроле без удобрений.

Поглощение элементов питания растениями льна-долгунца увеличивалось с ростом дозы

вносимых удобрений. Поступление азота как в корни, так и в стебли, возрастало при увеличении доз фосфора и калия, при выравненной его дозе в удобрении. У позднеспелого сорта Дипломат в корнях содержание элементов питания было больше, чем у раннеспелого сорта Зарянка. На перераспределение элементов питания из корней в стебель заметное влияние оказывали температурный и влажностный режим. В разные годы количество поступивших элементов различалось: азота – в 1.8–4.0 раза, фосфора – в 1.8–3.5 раза, калия – в 1.3–3.2 раза.

При оптимизации питания за счет внесения удобрений в дозах N30P22K80 (или (NPK)132) и N30P60K150 (или (NPK)240) доля стеблей в структуре растений льна возрастала. В фазе “быстрый рост” его доля составила у сорта Зарянка 45 и 46%, у сорта Дипломат – 44 и 49% соответственно дозам. Без применения удобрений доля стеблей была самой низкой: 38% у сорта Зарянка и 36% у сорта Дипломат, а доля корней и листьев – самой высокой (22 и 40% у сорта Зарянка и 42% у сорта Дипломат).

Отмечали положительное действие фосфорного удобрения (22 кг/д.в.) при добавлении его к дозе N30K80 на урожайность льносолумы на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве с высоким содержанием фосфора. Повышение урожайности льносолумы раннеспелого сорта Зарянка в среднем за 3 года составило 6.9 ц/га и 0.3 ц/га – льносемян, позднеспелого Дипломат – 6.1 и 0.2 ц/га соответственно в сравнении с вариантом без фосфора N30P0K50.

Наибольшая урожайность льносолумы в среднем за 3 года была получена при внесении дозы удобрений, полученной при расчете по соотношению элементов питания: N : P : K = 1 : 2 : 5 (или

(NPK)240). В отдельные годы урожайность льно-соломы в варианте расчета доз удобрений на компенсацию выноса ( $1 : 0.7 : 3.6 = (NPK)132$ ) была близкой к варианту (NPK)240. Позднеспелый сорт Дипломат в среднем за 3 года имел урожайность больше на 3.1–3.9 ц/га, чем раннеспелый сорт Зарянка. Урожайность льносемян при всех способах расчета удобрений была больше контроля без удобрений на 1.2–1.6 ц/га у сорта Зарянка и на 1.0–1.5 ц/га – у сорта Дипломат.

Применение более высокой дозы удобрения (N30P60K150) под раннеспелый сорта Зарянка снижало номер длинного волокна, и процентно-номер всего волокна особенно в засушливый вегетационный период. Снижение качественных показателей у позднеспелого сорта Дипломат не отмечено.

Установлено, что балансовый метод расчета по Каюмову в меньшей степени подходит для расчета дозы удобрения под лен-долгунец, т.к. расчетная доза азота сильно завышена, а фосфора – занижена.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черников В.Г., Ростовцев Р.А., Кудрявцев Н.А., Ущановский И.В., Попов Р.А., Скворцов С.С. Влияние факторов окружающей среды на урожай и качество льняного сырья // Вестн. аграрн. науки. 2020. № 5(86). С. 3–10.
2. Система оценки влияния агрохимических факторов на формирование урожайности льна-долгунца. М.: ВНИИА, 2016. 124 с.
3. Белоусова Е.Г., Спиридонов А.В., Титова В.И. Влияние удобрений на урожайность льна и качество льнопродукции при выращивании его на светло-серой лесной легкосуглинистой почве // Междунард. сел.-хоз. журн. 2019. № 1(367). С. 32–35.
4. Гаврилова А.Ю., Конова А.М. Урожайность льна-долгунца и качество волокна в зависимости от возрастающих доз минеральных удобрений // Вестн. Ульяновск. ГСХА. 2022. № 2(58). С. 52–59.
5. Кузьменко Н.Н., Сухопалова Т.П., Ильина В.И. Влияние агротехнологических элементов возделывания на продукционный процесс льна-долгунца // Перм. аграрн. вестн. 2019. № 1. С. 48–54.
6. Gupta M., Kour S., Gupta V., Bharat R., Sharma C. Effect of different doses of fertilizers in yield and NPK uptake of linseed (*Linum usitatissimum* L.) // Bangladesh J. Bot. 2017. V. 46(2). P. 575–581.
7. Поназев В.П., Медведева О.В. Современные достижения селекции и семеноводства для выращивания льна // Достиж. науки и техно АПК. 2015. Т. 29. № 9. С. 36–39.
8. Карпунин Б.Ф. Прогнозирование структуры урожая у льна-долгунца для применения в точном земледелии // Земледелие. 2016. № 1. С. 5–7.
9. Носевич М.А., Новохацкая Д.М. Урожай и качество волокна льна-долгунца в зависимости от сортовых особенностей, норм высева и применения биопрепаратов // Плодородие. 2015. № 6. С. 24–27.
10. Ториков В.Е., Шаков В.М., Романова И.Н. Эффективность агроприемов возделывания новых сортов льна-долгунца на юго-западе Нечерноземья России // Вестн. Ижевск. ГСХА. 2016. № 2. С. 16–25.
11. Сорокина О.Ю. Оценка ассортимента удобрений и способов их внесения под новый сорт льна-долгунца Универсал // Аграрн. наука. 2021. № 6(350). С. 55–59.
12. Практикум по агрохимии: Учеб. пособ. / Под ред. В.Г. Минеева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
13. Каюмов М.К. Программирование урожая сельскохозяйственных культур. М.: Агропромиздат, 1989. 56 с.
14. Тихомирова В.Я., Сорокина О.Ю., Кузьменко Н.Н., Нечушкин С.М. Усовершенствованная система применения удобрений в льняном севообороте. Торжок: ООО “Фирма Вариант”, 2005. С. 14–16.
15. Тихомирова В.Я., Сорокина О.Ю. Лен-долгунец. Биологические особенности. Управление формированием урожая и его качество: научн. изд-е. Тверь: Тверь. гос. ун-т, 2011. С. 100–101.
16. Golub I.A., Blokhina I.N. Reaction of Belarusian and French fiber flax samples on nitrogen doses along the duration of the growing season, yield of seeds and fiber // Crop Farm. Plant Grow. 2020. V. 2. P. 52–55.
17. Кошелева Л.Л. Физиология питания и продуктивность льна-долгунца. Минск: Наука и техника, 1980. 200 с.
18. Методические указания по проведению агрохимических исследований со льном-долгунцом. М.: Типография ВАСХНИЛ, 1972. 49 с.
19. ГОСТ 14897-69 Солома льняная. Изд-е офиц. М.: Изд-во стандартов, 1979. 16 с.
20. Методические указания по проведению технологической оценки льносоломы и опытов по первичной обработке льна. Торжок: ВНИИЛ, 1972. 38 с.
21. Сорокина О.Ю. Продуктивность льна-долгунца в зависимости от метеоусловий, удобрений и сорта // Агротехн. вестн. 2022. № 3. С. 23–27.

## Managing the Productivity of Flax by Optimizing Nutrition

O. Yu. Sorokina<sup>#</sup>

*Federal Research Center for Bast Fiber Crops,  
Komsomolskiy prosp. 17/56, Tver 170041, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: olga-sorokina@bk.ru*

In the Tver region, on sod-podzolic light loamy soil, the productivity management of fiber flax varieties (Zaryanka and Diplomat) with different maturation periods was studied by optimizing their mineral nutrition. To calculate the dose of mineral nutrition, 3 methods were used: balanced modified by Kayumov, balanced to compensate for the removal, and by the ratio of elements in the fertilizer. Accordingly, the doses were N0P0K0 (control), N30P0K50, N30P22K80, and N30P60K150. It was found that despite various weather conditions, the use of fertilizers from the initial phases of flax plant growth allowed plants to accumulate a large biomass: in arid conditions, on average, for varieties by 58% more, in optimal water supply conditions – by 45%. The absorption of nutrients by flax plants increased with an increase in the dose of the introduced elements. With an equal dose of nitrogen in the fertilizer, its amount was greater both in the roots and stems of flax, with increasing doses of phosphorus and potassium in the fertilizer. The content of nitrogen, phosphorus and potassium in the flax roots of the late-maturing Diplomat variety was higher than that of the early-maturing Zaryanka. When optimizing nutrition by applying fertilizers in doses of N30P22K80 and N30P60K150, the proportion of stems in the structure of flax plants increased and amounted to 45 and 46% in the Zaryanka variety, 44 and 49% in the Diplomat variety, respectively to dosage. Without fertilizers, the share of the stem was 38%, and the share of roots and leaves was the highest – 22 and 42%. The production process in this case was less rational. The late-maturing Diplomat variety, on average, for 3 years, when applying all doses of fertilizers, had a yield of flax straw by 3.1–3.9 c/ha more than the early-maturing Zaryanka variety. In the early-maturing variety Zaryanka, a higher dose of fertilizers N30P60K150 reduced the quality indicators: the number of the long fiber and the percentage number of the entire fiber, especially during the dry growing season.

*Keywords:* fiber flax (*Linum usitatissimum*), mineral fertilizers, NPK doses, productivity, variety.

УДК 631.811.98:631.417

## БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ГУМИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ ТОРФА В КАЧЕСТВЕ РОСТСТИМУЛИРУЮЩИХ ПРЕПАРАТОВ

© 2024 г. О. В. Броварова\*

*Институт агробиотехнологий им. А. В. Журавского Коми НЦ УрО РАН  
ул. Ручейная, 27, Сыктывкар 167023, Россия*

*\*E-mail: olbrov@mail.ru*

Изучили биологическую активность гуминовых веществ торфа в качестве ростостимулирующих препаратов для сельскохозяйственных культур овса и гороха. Установлено, что в состав гуминовых веществ входят различные функциональные группы (фенольные и алифатические гидроксилы, карбоксильные, хиноидные), которые определяют биологическое и ростостимулирующее действие. Показано, что примененные в эксперименте растворы гуминовых веществ оказывали благоприятное воздействие на семена даже в небольших концентрациях.

*Ключевые слова:* гуминовые вещества, торф, биологическая активность, фитозффект, функциональные группы.

**DOI:** 10.31857/S0002188124080076, **EDN:** CDWBNL

### ВВЕДЕНИЕ

В условиях обилия и разнообразия форм удобрений, предлагаемых для применения в сельском хозяйстве, существует ряд подходов использования удобрений гуматного типа как средства для повышения плодородия и качества почвы, это можно объяснить многообразным действием содержащихся в них гуминовых кислот. Гуминовые препараты можно использовать в качестве органоминерального удобрения, они способствуют увеличению биологической активности почвы и обогащению семян макро- и микроэлементами, действуя как стимулятор роста.

Актуальным вопросом является поиск путей наиболее рационального, экологически безопасного использования различных видов удобрений в сельскохозяйственной промышленности [1]. Поэтому все больше повышается интерес к удобрениям гуматного типа для увеличения плодородия и качества почв сельскохозяйственного назначения. Гуминовые вещества представляют собой специфическую группу природных биополимеров, которые являются активными веществами, усиливают и регулируют обменные процессы, не токсичны.

В научной литературе достаточно широко подтверждено положительное влияние гуминовых веществ (ГВ) на процессы развития как семян, так и самих растений в период вегетации, укоренения черенков, корнеобразования. При этом во многих случаях они снижают воздействие

неблагоприятных факторов среды, в результате повышается урожайность и качество сельскохозяйственной продукции [2–5].

При изучении механизма биологической активности ГВ выдвигаются различные гипотезы. Этот вопрос особенно тщательно изучают в отношении биологической активности и действия ГВ на метаболизм растений. Предполагается, что ГВ способны воздействовать на проницаемость клеточных мембран, увеличивать доступность в почвах элементов питания за счет их способности к образованию комплексов и повышения подвижности, а также на дыхательный метаболизм и фотосинтез, передачу растениям органических и минеральных элементов и т.п. Кроме этого, обсуждают возможности применения ГВ в качестве матрицы микроэлементов для улучшения поглощения растениями удобрений и улучшения структуры почвы [5, 6].

Структурные особенности позволяют гуминовым веществам участвовать в разнообразных биохимических реакциях, образовывать комплексные соединения, влиять на фотохимические процессы и т.п. Кроме того, они могут служить источником структурных фрагментов органических макромолекул при биосинтезе в тканях растений [7]. Такие уникальные свойства ГВ могут определять их разнообразную биологическую активность. К сожалению, задачу усложняет обстоятельство сложного выделения и определения в структуре макромолекулы гуминового вещества участка или функциональных групп, от которых зависит вид биологической активности. Помимо этого, разветвленное

строение молекулы, наличие большого количества реакционноспособных функциональных групп и их пространственное расположение способствуют одновременному прохождению различных химических реакций, а значит, и проявлению биологической активности [8].

Гуминовые вещества – химически неоднородные соединения, содержащие в своем составе различные функциональные группы [9]. На сегодняшний день в химической структуре гуминовых веществ установлено более десятка различных типов групп, такие как карбоксильные, фенольные и спиртовые гидроксилы, карбонильные, хиноидные, метоксильные, сложноэфирные, амино-, амидо- и имидогруппы, сульфо-, тиольные и дисульфидные группы [10–12]. Сложность химического строения гуминовых веществ при наличии большого количества различных функциональных групп, способность образовывать межмолекулярные и внутримолекулярные связи дают возможность ГВ вступать в различные химические связи и проявлять биологическую активность.

Гуминовые вещества имеют сбалансированный набор микро- и макроэлементов, обеспечивающих повышение защитных свойств растений и проростков от ряда грибковых и бактериальных заболеваний, позволяющих решать важные экологические и агрономические проблемы [13]. Также гуминовые вещества, в силу химического и структурного состава, способны концентрировать азот и постепенно освобождать его в виде разнообразных химических соединений [14].

Такой состав препаратов обуславливает их незаменимость для предпосевной обработки семян и полива вегетирующих растений в условиях пониженной биологической активности почв на фоне низкой обеспеченности растений микроэлементами [15, 16].

В процессе изучения эффективности действия гуминовых препаратов выявлено, что они оказывают на растения стимулирующее, адаптогенное и биопротекторное действие. При использовании гуминовых препаратов ускоряется рост растений, сокращаются сроки вегетации [17]. Цель работы – изучение биологической активности гуминовых веществ торфа в качестве ростстимулирующих препаратов для сельскохозяйственных культур овса и гороха.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования были натриевые и калиевые соли гуминовых кислот (ГК), выделенные путем щелочной экстракции при температуре 23°C и с последующим кислотным осаждением. ГК были выделены из образца низинного торфа,

отобранного на торфяном месторождении Сыктывдинского р-на Республики Коми.

Инфракрасные спектры растворов ГВ снимали на спектрометре Specord-M-80 в области частот 4000–400 см<sup>-1</sup> [18]. Алифатические гидроксильные группы определяли методом фталирования [19]. Фенольные гидроксильные группы и карбоксильные группы определяли хемосорбционным методом [20]. Хиноидные группы определяли потенциометрическим методом в растворе 0.1 н. K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> [21].

В качестве экспериментальных растений использовали овес сорта Левша (производитель Омский АНЦ) и горох овощной сорта Альфа (производитель ООО Центр-Огородник). Вегетационный период растений составлял 55–70 сут. В опыте использовали торфо-песчаную смесь (2 : 1), которую после смешивания обеззараживали при температуре 100°C. Рабочие растворы гуминовых препаратов для экспериментальной группы растений с pH = 7.0 готовили в 0.05 М растворе NaOH, далее разбавляли до концентраций 1.0, 0.5, 0.025, 0.01%. Дозировка препаратов ГК была принята за диапазон оптимальных концентраций на основании результатов работы, в которой выявлена высокая эффективность промышленных ГК [22].

Всхожесть семян овса определяли на 7-е сут, гороха – на 8-е сут. Повторность опыта четырехкратная. Для аграрного эксперимента были высажены в почву контрольная и экспериментальная группы семян овса и гороха по 30 шт./сосуд. Биометрические характеристики (высота растений, длина и ширина листа, длина корней) измеряли каждые 15 сут в течении всего вегетационного периода, который составил в среднем 65 сут.

В качестве стандартного (положительного) контроля был выбран препарат “Гуми” производства ООО “НВП БашИнком”, г. Уфа. Раствор препарата готовили согласно инструкции в описании.

Биологическую активность определяли по показателю фитоэффекта, который рассчитывали, как  $n \times l$ , где  $n$  – средняя длина корней, % к контролю;  $l$  – средняя всхожесть, % к контролю. Под фитоэффектом понимают оценку степени стимулирующего или ингибирующего действия тестируемых ГК на сельскохозяйственные растения.

Содержание фотосинтетических пигментов анализировали с помощью спектрофотометра GENESYS 150 при  $\lambda = 470, 649$  и  $665$  нм в кюветках 1 см [22]. Содержание белка в зеленых частях растений определяли методом Bradford [24]. Исследованные ткани растений массой 200 мг растирали в фосфатном буфере pH 7.6 до однородной массы в фарфоровой ступке на холоде. Оптическую плотность измеряли на спектрофотометре GENESYS 150 в кювете толщиной 1 см при  $\lambda = 595$  нм. Содержание

аскорбиновой кислоты [25] определяли по методу Мури, рабочий раствор титровали раствором 2,6-дихлорфенолиндофенолята натрия (краска Тильманса) до розовой окраски.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Биологические и химические свойства ГВ проявлялись за счет особенностей молекулярной структуры. Полученные данные ИК-спектроскопии и анализа функционального состава показали, что гуминовые вещества низинного торфа содержали достаточно разнообразный спектр реакционноспособных функциональных групп (рис. 1).

ИК-спектры имели характерный для ГВ набор пиков [26–28]: область  $3600\text{--}3400\text{ см}^{-1}$  обусловлена валентными колебаниями  $\text{—OH}$  групп, преимущественно связанных водородными связями. Интервал полосы  $3250\text{--}3200\text{ см}^{-1}$  отвечает валентным колебаниям  $\text{—NH}$  в структуре амида и аминов, также участвующих в водородных связях. Область  $2931\text{--}2929\text{ см}^{-1}$  характеризуется валентными колебаниями  $\text{—H}_3\text{—}$  и  $\text{—CH}_2\text{—}$  групп боковых цепей в молекуле ГК, вызванных преимущественно метиленовыми группировками, на что указывает и полоса асимметричных и симметричных деформационных колебаний в области  $1480\text{--}1380\text{ см}^{-1}$ . Максимум интенсивности в интервале от  $1720$  до  $1660\text{ см}^{-1}$  относится к колебанию группы  $\text{C=O}$ , которая может быть представлена кетонами, альдегидами, карбоновыми кислотами и их функциональными производными [27, 28].

Область  $1637\text{--}1600\text{ см}^{-1}$  обусловлена плоскостными колебаниями сопряженных углерод-углеродных (ароматические,  $\nu\text{C=C}$ ) и углерод-кислородных связей (карбонилы, связанные водородными связями, карбоксилат-ионы,  $\nu\text{C=O}$ ) в ароматическом скелете и хинонах.

Известно, что содержащиеся в химическом составе ГВ фенольные гидроксильные группы и сильноокислые (карбоксильные) группы имеют большее значение для химических реакций, также они участвуют в ионообменных процессах и определяют кислотные свойства природных биополимеров (табл. 1) [2].

Хиноидные группы в химической структуре ГВ делают возможным их участие в реакциях по свободно-радикальному механизму

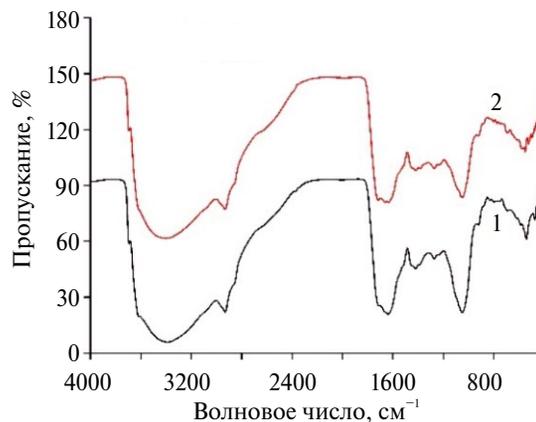


Рис. 1. ИК-спектры гуминовых веществ: 1 – ГВ–На, 2 – ГВ–К.

и вступление в окислительно-восстановительные процессы. Предполагается, что именно хиноны и определяют биологическую активность ГВ [29].

На основании экспериментальных данных можно сделать заключение, что применение небольших концентраций гуминовых веществ в растворе в большей степени стимулировало рост и развитие растений. Время наступления фенологических фаз в контроле и экспериментальных группах растений различалась незначительно.

ГВ в качестве микроудобрений применяют и как регуляторы и стимуляторы роста растений, поэтому для определения биологической активности используется метод фитотестирования [29]. При использовании данного метода определяют следующие показатели: энергию прорастания, всхожесть, длину корней и coleoptилей семян высших растений [30]. По полученным данным нами был рассчитан фитoeffект (рис. 2).

Установлено, что растворы солей гуминовых кислот с концентрацией  $0.01\text{--}1.0\%$  положительно влияли на рост и развитие семян овса и гороха, показывая рост проростков во всем диапазоне концентраций гуминовых препаратов. Все 3 испытанных препарата оказали ростстимулирующий эффект, наиболее значимый в области низких концентраций гуминовых препаратов.

Эффективность препаратов уменьшалась по мере увеличения концентрации. Таким образом,

Таблица 1. Содержание функциональных групп ГВ торфа, %

Образец	Хиноидные группы, ммоль/г	ОН <sub>фен</sub>	СООН	Σ(ОН <sub>фен</sub> + ОН <sub>карб</sub> )	ОН <sub>алиф</sub>
		%			
ГВ–К	6.1	6.66	10.0	16.7	11.3
ГВ–На	6.3	7.56	11.9	19.5	9.99

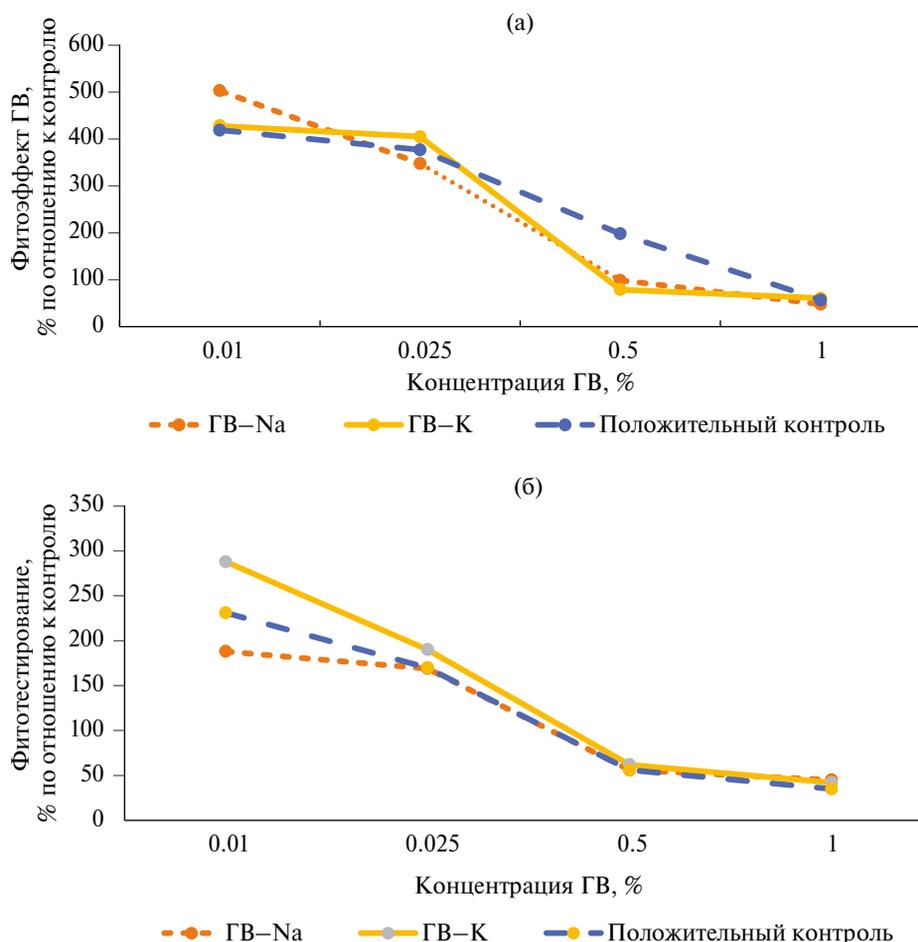


Рис. 2. Фитоэффект ГВ из торфа на семенах овса (а) и гороха (б).

наиболее высоким ростостимулирующим действием обладали растворы ГВ с небольшими концентрациями, кроме этого их эффект в малых дозах (0.025 и 0.01%) был обусловлен собственной физиологической активностью гуминовых веществ.

Установлено, что биологическая активность ГВ определяется как способность принимать участие в окислительно-восстановительных реакциях в растительной клетке. Таким образом, биологическую активность связывают со структурными параметрами, отражающими содержание хиноидных групп, фенольных гидроксидов, а также содержание свободных радикалов [21, 31].

Структурно-групповой анализ ГВ показал, что ГВ торфа более окислены, о чем свидетельствовало наличие в составе хиноидных и карбоксильных групп. Именно наличие хиноидных структур связывают с биологической активностью гуминовых препаратов, т.к. хиноны обладают большой окислительно-восстановительной способностью и являются катализаторами этих реакций. Кроме этого, хиноидные группы способны связывать

свободный радикал, т.к. обладают парамагнитными свойствами. В результате этого формируется нейтральная молекула и менее активный радикал (процесс ингибирования) или нейтральная молекула и активный радикал, который будет инициировать радикальный процесс [21]. Поэтому можно предположить, что растворы ГВ будут проявлять стимулирующее действие на рост и развитие растений.

Одним из важных показателей воздействия гуминовых препаратов является количество фотосинтетических пигментов, что определяет способность к поглощению световой энергии растением для процесса фотосинтеза. Кроме этого, с пигментами связана не только светочувствительность растений, но и регуляция метаболизма, рост и цветение, регуляция процессов прорастания семян, выполнение функции резерва питательных веществ, а также их противомикробная и противогрибковая активность.

По окончании вегетационного периода в зеленых частях растений были определены некоторые их качественные характеристики (табл. 2).

Таблица 2. Качественные характеристики растений гороха и овса

Показатель	Контроль	Положительный контроль	Массовая концентрация ГП в растворе, %		
			0.5	0.025	0.01
Горох					
Хлорофилл <i>a</i> , мг/г	$8.7 \times 10^{-4} \pm 0.03$	$9.5 \times 10^{-4} \pm 0.04$	$1.2 \times 10^{-3} \pm 0.04$	$1.3 \times 10^{-3} \pm 0.07$	$1.5 \times 10^{-3} \pm 0.04$
Хлорофилл <i>b</i> , мг/г	$6.8 \times 10^{-4} \pm 0.01$	$9.0 \times 10^{-4} \pm 0.06$	$9.8 \times 10^{-4} \pm 0.05$	$1.1 \times 10^{-3} \pm 0.03$	$1.2 \times 10^{-3} \pm 0.06$
Каротиноиды, мг/г	0.10 ± 0.01	0.11 ± 0.02	0.12 ± 0.01	0.13 ± 0.01	0.14 ± 0.02
Аскорбиновая кислота, мг/100 г	6.1	7.9	7.6	8.7	9.9
Белок, г/100 г	5.8	6.0	6.3	7.0	7.5
Овес					
Хлорофилл <i>a</i> , мг/г	$8.4 \times 10^{-4} \pm 0.02$	$9.8 \times 10^{-4} \pm 0.06$	$1.1 \times 10^{-3} \pm 0.06$	$1.17 \times 10^{-3} \pm 0.06$	$1.28 \times 10^{-3} \pm 0.05$
Хлорофилл <i>b</i> , мг/г	$7.2 \times 10^{-4} \pm 0.04$	$9.4 \times 10^{-4} \pm 0.08$	$1.1 \times 10^{-3} \pm 0.06$	$1.2 \times 10^{-3} \pm 0.05$	$1.5 \times 10^{-3} \pm 0.07$
Каротиноиды, мг/г	0.11 ± 0.02	0.11 ± 0.01	0.12 ± 0.01	0.13 ± 0.01	0.14 ± 0.02
Белок, г/100 г	6.6	7.9	7.3	8.1	8.6
Сухое вещество, г/кг	135	140	123	148	154
Сырая клетчатка, г/кг	201	240	235	240	244

Показано, что гуминовые препараты благоприятно воздействовали на рост и развитие растений, особенно выделялись те, которых обрабатывали растворами гуминовых препаратов с концентрациями 0.025 и 0.01%. Растения, которые получали гуминовые удобрения, содержали наибольшее количество пигментов, это объясняется условиями минерального питания растений. В процессе образования хлорофилла растениям необходимо большое количество железа. Известно, что при недостатке такого элемента как железо, листья растений могут терять окраску. Этот микроэлемент участвует в процессе синтеза  $\alpha$ -аминолевулиновой кислоты из глицерина и сукцинил-КоА, а также синтеза протопорфирина. Также на синтез хлорофилла большое влияние оказывает снабжение растений азотом и магнием, т.к. оба эти элемента входят в состав хлорофилла.

При недостатке меди хлорофилл будет легко разрушаться, связано это с тем, что медь способствует образованию устойчивых комплексов между хлорофиллом и соответствующими белками [21].

Общее содержание белка в растениях, выращенных с помощью подкормки из ГВ торфа, было в 1.5 раза больше, чем в контрольном варианте. Данный результат можно связать с тем, что в гуминовых веществах содержится большое количество аммонийного азота, находящегося в доступной для растений форме для синтеза собственных азотсодержащих соединений и белков.

Одна из функции аскорбиновой кислоты — это участие в дыхании растений. Она также увеличивает устойчивость растений, т.к. способна окисляться окислительными растительными ферментами

класса оксидоредуктаз, которые служат катализаторами окислительно-восстановительных реакций.

Таким образом, растения получившие подкормки гуминовыми веществами торфа, отличались большим количеством фотосинтетических пигментов белка и аскорбиновой кислоты по сравнению с контрольным вариантом. Также удобрения на основе ГК оказали высокое ростстимулирующее влияние, при этом максимальный эффект показали растворы с небольшими концентрациями (0.025 и 0.01%). Это обусловлено собственной физиологической активностью гуминовых веществ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенное исследование с тест-культурами овса и гороха показало, что применение препаратов гуминовых веществ (ГВ) в оптимальных дозах значительно влияло на рост, развитие растений, всхожесть, семян, улучшало питание растений, увеличивало длину и биомассу проростков. Наилучший результат показали растворы ГВ с меньшими концентрациями (0.025 и 0.01%), которые способствовали увеличению в 1.5 раза всхожести семян растений, а также увеличению длины корней и высоты проростков овса и гороха.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еськов А.И., Новиков М.Н., Лукин СМ. Справочная книга по производству и применению органических удобрений. Владимир: РАСХН, ВНИПТИОУ, 2001. 495 с.

2. Орлов Д.С. Свойства и функции гуминовых веществ // Гуминовые вещества в биосфере. М.: Наука, 1993. С. 16–27.
3. Соромотина Т.В. Практикум по овощеводству. Пермь: Прокрость, 2016. 305 с.
4. Федотов Г.Н., Шуба С.А., Федотова М.Ф., Степанов А.Л., Стрелецкий Р.А. Почвенные дрожжи и их роль в прорастании семян // Почвоведение. 2017. № 5. С. 592–602.
5. Nardi S., Pizzeghello D., Muscolo A., Vianello A. Physiological effects of humic substances on higher plants // Soil Biol. Biochem. 2002. V. 34. № 11. P. 1527–1536. DOI: 10.1016/S0038-0717(02)00174-8
6. Безуглова О.С. Гуминовые вещества в биосфере: учеб. пособ. Ростов-н/Д: Южный фед. ун-т, 2009. 120 с.
7. Якименко О.С., Терехова В.А. Гуминовые препараты и оценка их биологической активности для целей сертификации // Почвоведение. 2011. № 11. С. 1334–1343.
8. Sherry L. Investigating the biological properties of carbohydrate derived fulvic acid (CHD-FA) as a potential novel therapy for the management of oral biofilm infections // BMC Oral Health. 2013. V. 13. P. 47.
9. Nebbioso A., Piccolo A. Basis of a humeomics science: chemical fractionation and molecular characterization of humic biosuprastructures // Biomacromolecules. 2011. V. 12. P. 1187–1199. DOI: 10.1021/bm101488e
10. Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Суханова Н.И. Химия почв: учеб.-к. М., 2005. 558 с.
11. Попов А.И. Гуминовые вещества: свойства, строение, образование / Под ред. Е.И. Ермакова. СПб.: Изд-во СПбУ, 2004. 248 с.
12. Чимитдоржиева Г.Д., Чимитдоржиева Э.О., Цыбенков Ю.Б. Особенности химической структуры гуминовых кислот мерзлотных черноземов юга Витимского плоскогорья // Усп. совр. естествозн. 2020. № 10. С. 50–54. DOI: 10.17513/use.37490
13. Аввакумова П.Н. Гуминовые вещества – фактор защиты биосистем от экотоксикантов // Изв. Самар. НЦ РАН. 2009. Т. 11. № 1(2). С. 197–201.
14. Савченко И.А., Корнеева И.Н., Лукаш Е.А., Пасечник К.К. Биологическая активность гуминовых веществ: перспективы и проблемы их применения в медицине // Медиаль. 2019. № 1(23). С. 54–60. DOI: 10.21145/2225-0026-2019-1-54-60
15. Пронько В.В., Корсаков К.В. Эффективность солей гуминовых кислот при возделывании озимой пшеницы на южных черноземах // Агрохимия. 2011. № 8. С. 51–59.
16. Шахметов И.Т., Кузнецов В.И., Гилязетдинов Ш.Я. Защитно-стимулирующие и адаптогенные свойства препарата ГУМИ – биоактивированной формы гуминовых кислот. Эффективность его использования в сельском хозяйстве. Уфа, 2000. 102 с.
17. Орлов Д.С. Химия почв. М.: Изд-во МГУ, 2005. 259 с.
18. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия. Основы, техника, аналитическое применение / Под ред. А.Л. Мальцева. М.: Мир, 1982. 365 с.
19. Губен В. Методы органической химии. Методы анализа. М., 1967. Т. 2. 329 с.
20. Закис Г.Ф. Функциональный анализ лигнинов и их производных. Рига: Зинатне, 1987. 230 с.
21. Дмитриева Е.Д., Сяндюкова К.В., Акатова Е.В., Леонтьева М.М., Волкова Е.М., Музафаров Е.Н. Биологическая активность гуминовых веществ сапропеля реки Упы Тульской области // Химия раст. сырья. 2017. № 1. С. 137–144. DOI: 10.14258/jcrpm.2017011418
22. Изосимов А.А. Физико-химические свойства, биологическая активность и детоксицирующая способность гуминовых препаратов, отличающихся генезисом органического сырья: Дис. ...канд. биол. наук. М.: МГУ, 2016. 148 с.
23. Русак С.Н., Кравченко И.В., Филимонова М.В., Башкатова Ю.В. Экологическая биохимия растений: химические и биохимические методы анализа: метод. рекоменд. Сургут: Изд. центр СурГУ, 2012. URL: <https://elib.surgu.ru/fulltext/umm/100509> (дата обращения: 26.10.2023).
24. Невмержицкая Ю.Ю., Тимофеева О.А. Практикум по физиологии и биохимии растений (белки и ферменты): Учеб.-метод. пособ. Казань: Казан. ГУ, 2012. 36 с.
25. Гамаюрова В.С., Ржежицкая Л.Э. Пищевая химия: учеб.-к для студ. вузов: учеб. пособ., электр. изд-е сетев. распростр. М.: КДУ, Добросвет, 2018. URL: <https://bookonline.ru/node/1525/> (дата обращения: 26.10.2023). DOI: 978-5-7913-1042-2
26. Лиштван И.И., Капуцкий Ф.Н., Янута Ю.Г. Спектральные исследования фракций гуминовых кислот // Хим. тверд. топлива. 2006. № 4. С. 3–11.
27. Stevenson F.J. Humic chemistry: Genesis, composition, reactions. 2nd ed. N.Y.: John Wiley & Sons, 1994. P. 34–41.
28. Белоусов М.В., Ахмеджанов Р.Р., Гостищева М.В., Юсубов М.С., Матвеев А.В. Исследование химических и токсических свойств гуминовых кислот низинного древесно-травяного торфа Томской области // Бюл. сибир. мед. 2009. № 4(2). С. 27–33.
29. Lovley D.R. Humic substances as a mediator for microbially catalyzed metal reduction // Acta Hydrochim. Hydrobiol. 1998. V. 26. P. 152–157.
30. Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Экологическое состояние и функции почв в условиях химического загрязнения. Ростов/нД.: Ростиздат, 2006. 385 с.
31. Жеребцов С.И., Малышенко Н.В., Андроханов В.А. Гуминовые препараты: связь структурно-группового состава и биологической активности // Вестн. Кузбас. ГТУ. Сер. Хим. технол. 2018. № 5. С. 52–60. DOI: 10.26730/1999-4125-2018-5-52-60

## The Study of the Biological Activity of Humic Substances of Peat as Growth-Stimulating Drugs

O. V. Brovarova<sup>#</sup>

*A. V. Zhuravsky Institute of Agrobiotechnology of Komi Scientific Centre of the Ural Branch of RAS,  
ul. Rucheynaya, 27, Syktyvkar 167023, Russia*

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

Humic substances are a group of high-molecular biopolymers that are formed during the natural decomposition of plant and animal tissue. Due to their functional composition, humic substances of peat have a sufficiently large range of biological properties, they are quickly involved in the metabolic processes in plants. The use of humic substances as micronutrients leads to increased resistance to adverse factors, the development of the root system, improves the synthesis of chlorophyll, which increases the yield and quality of cultivated plants. The paper considers the influence of natural biopolymers such as humic substances of peat on the growth and development of agricultural plants of oats and peas. It has been established that the composition of humic substances includes various functional groups (phenolic and aliphatic hydroxyls, carboxylic, quinoid), which determine the biological and growth-stimulating effect. It has been shown that solutions of humic substances used in the experiment have a beneficial effect on seeds even in small concentrations. The purpose of this research work is to study the biological activity of humic substances of peat as growth-stimulating drugs of agricultural crops

*Key words:* humic substances, peat, biological activity, phytoeffect, functional groups.

УДК 632.954:633.854.78:633.34:633.15

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПЕЛАРГОНОВОЙ КИСЛОТЫ В КАЧЕСТВЕ ГЕРБИЦИДА В ПОСЕВАХ ПОДСОЛНЕЧНИКА, СОИ И КУКУРУЗЫ

© 2024 г. А. С. Голубев\*

*Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений  
196608 Санкт-Петербург–Пушкин, шоссе Подбельского, 3, Россия**\*E-mail: golubev100@mail.ru*

Увеличение засоренности полей вследствие распространения минимальных и нулевых технологий обработки почвы требует проведения защитных мероприятий с использованием химических пестицидов. В связи с ограничениями использования глифосата в ассортименте возникает вакантная ниша для новых гербицидов, способных оказывать общеистребительное действие. В полевых мелкоделяночных опытах, проведенных в течение сезонов 2022 и 2023 гг., в посевах подсолнечника сорта Енисей, сои сорта Марина и кукурузы гибридов ЕС Катамаран и РНИИСК 1 установлена высокая эффективность применения пеларгоновой кислоты (525 г/л) в качестве гербицида до появления всходов сельскохозяйственных культур. В среднем при внесении препарата 21 л/га снижение общей засоренности составило 87, 35 л/га – 93, 49 л/га – 96% соответственно. Все присутствовавшие в опыте виды сорных растений были высокочувствительными к обработке пеларгоновой кислотой (525 г/л). Через 15 сут после ее внесения в норме 49 л/га гибель щирицы запрокинутой и таких злаковых сорняков, как просо сорное, щетинник сизый и ежовник обыкновенный, была на уровне 94–98%, гибель всех остальных видов сорняков составила 100%. Снижение засоренности после применения пеларгоновой кислоты приводило к достоверному увеличению урожайности сельскохозяйственных культур по сравнению с необработанным контролем. Прибавки урожая сои достигали 17,7, кукурузы – 78,2, подсолнечника – 108%.

*Ключевые слова:* сорняки, гербициды, пеларгоновая кислота, эффективность, подсолнечник, соя, кукуруза.

**DOI:** 10.31857/S0002188124080086, **EDN:** CDQALJ

### ВВЕДЕНИЕ

Ввиду широкого распространения в современном растениеводстве минимальных и нулевых технологий обработки почвы усиливается засоренность полей [1, 2]. При этом в значительной степени возрастает актуальность борьбы с многолетними корнеотпрысковыми двудольными сорняками и пыреем ползучим. Внесение гербицидов целесообразно не только в период вегетации, но и до появления всходов культурных растений, для чего перспективны препараты на основе глифосата. Это действующее вещество не накапливается в почве и его можно использовать, обрабатывая вегетирующие сорные растения до посева или до всходов многих медленно прорастающих культур [3].

Эффективность применения подобных препаратов была доказана полевыми исследованиями [4, 5]. Однако в последние годы в Российской Федерации в связи с ограничениями использования глифосата в существующем ассортименте возникает вакантная ниша для новых гербицидов, способных оказывать

общеистребительное действие по отношению к широкому спектру сорных растений [6, 7].

Одним из действующих веществ, привлекающих повышенное внимание ученых в области гербологии и защиты растений от сорняков, во многих странах является пеларгоновая кислота [8–12]. Однако у нас в стране до последнего времени использование пеларгоновой кислоты ограничивалось борьбой с мхами, лишайниками и нежелательной травянистой растительностью на газонах в условиях личных подсобных хозяйств [13].

Цель работы – определение эффективности действия пеларгоновой кислоты в качестве гербицида на полях, предназначенных под посев подсолнечника, сои и кукурузы.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Опыт проводили в течение 2-х вегетационных сезонов (2022 и 2023 гг.) на полях под посев подсолнечника сорта Енисей (в Алтайском крае), сои сорта Марина в Саратовской обл. и кукурузы

гибрида ЕС Катамаран (2022 г.) и РНИИСК 1 (2023 г.) в Волгоградской обл.

В качестве объекта изучения, содержащего пеларгоновую кислоту (525 г/л), был выбран гербицид ТОРНАДО Био, МКЭ производства отечественной компании АО Фирма “Август”. Изучали 3 нормы применения этого препарата: 21, 35 и 49 л/га. В качестве эталона был выбран препарат Суховой, ВР (280 г диквата дибромида/л, 150 г/л в пересчете на дикват-ион) в нормах применения 1 и 2 л/га. В качестве контроля использовали участок поля без обработки гербицидами и без проведения каких-либо мероприятий по защите сельскохозяйственной культуры от сорных растений.

Внесение гербицидов проводили путем опрыскивания вегетирующих сорных растений с помощью ручных ранцевых опрыскивателей (Резистент 3610, Соло 425) до появления всходов сельскохозяйственных культур. Расход рабочей жидкости в пересчете на 1 га составлял: 700 л для препарата ТОРНАДО Био, МКЭ и 200 л для эталона Суховой, ВР.

Опыты закладывали в соответствии с методическими рекомендациями [14] и методическими указаниями [15]. Площадь каждой опытной делянки составляла 25 м<sup>2</sup>. Повторность четырехкратная. Размещение делянок внутри схемы опыта было рендомизированным.

Учеты сорных растений проводили количественно-весовым методом перед внесением гербицидов (исходная засоренность), а также через 15 и 30 сут после обработки. Учеты осуществляли на каждой делянке опыта на 4-х учетных площадках, площадь каждой из которых составляла 0.25 м<sup>2</sup>.

Биологическую эффективность определяли по формуле:  $БЭ = (К - Г) / К \times 100$ , где БЭ – биологическая эффективность гербицида, %, К – количество сорных растений в необработанном контроле, экз./м<sup>2</sup>, Г – количество сорных растений в варианте с применением гербицида, экз./м<sup>2</sup>.

Урожай убирали вручную с каждой делянки опыта. Полученные данные обрабатывали с помощью однофакторного дисперсионного анализа с расчетом *HSP* при 95%-ном уровне значимости.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Засоренность посевов сельскохозяйственных культур в необработанном контроле находилась на среднем уровне и составляла от 38.0 до 54.0 экз./м<sup>2</sup> (лишь в 2023 г. в Алтайском крае наблюдали значительно более высокую засоренность до 297 экз./м<sup>2</sup> вследствие сильного засорения опытного участка растениями проса сорного). В этих условиях использование пеларгоновой кислоты в качестве гербицида обеспечивало существенное снижение засоренности посевов (табл. 1).

Наименьшая эффективность препарата пеларгоновой кислоты (68.0–71.0%) была отмечена при внесении препарата в норме 21 л/га в условиях Алтайского края в 2022 г. В то же время даже эти показатели были больше эффективности эталона Суховой, ВР в минимальной норме применения 1 л/га (49.0–51.0%). Использование больших норм применения пеларгоновой кислоты в том же опыте обеспечивало эффективность на уровне 93.0–100%, что превышало

**Таблица 1.** Снижение засоренности посевов сельскохозяйственных культур после применения пеларгоновой кислоты (525 г/л) (2022, 2023 гг.), % к контролю

Вариант	Время после обработки, сут	Алтайский край, подсолнечник		Саратовская обл., соя		Волгоградская обл., кукуруза	
		2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.
Пеларгоновая кислота, 21 л/га	15	68.0	85.0	94.7	95.6	93.2	96.1
	30	71.0	84.0	90.0	89.4	87.5	87.0
35 л/га	15	93.0	92.0	97.4	95.6	90.9	94.2
	30	93.0	93.0	92.5	91.5	89.6	88.9
49 л/га	15	100	97.0	97.4	97.8	95.5	98.1
	30	98.0	97.0	92.5	95.7	91.7	90.7
Суховой, ВР 1 л/га	15	51.0	80.0	94.7	93.3	86.4	92.3
	30	49.0	81.0	92.5	87.2	79.2	85.2
Суховой, ВР 2 л/га	15	78.0	91.0	92.1	95.6	90.9	96.1
	30	80.0	91.0	90.0	89.4	85.4	88.9
Контроль*	15	41.0	297	38.0	45.0	44.0	52.0
	30	41.0	277	40.0	47.0	48.0	54.0

\* Приведены данные абсолютных показателей засоренности необработанного контроля (экз./м<sup>2</sup>).

показатели эффективности нормы эталона Суховой, ВР 2 л/га (78.0–80.0%).

В остальных вариантах эффективность пеларгоновой кислоты была больше, поэтому в среднем во всех вариантах при внесении препарата 21 л/га снижение засоренности составляло 87%. С увеличением нормы применения препарата до 35 и 49 л/га его эффективность возрастала до 93 и 96% соответственно. При этом полученная эффективность подтвердила выявленную тенденцию: эффективность пеларгоновой кислоты 21 л/га превышала эффективность эталона Суховой, ВР 1 л/га и приближалась к эффективности эталона в норме 2 л/га, а эффективность препарата в нормах 35 и 49 л/га превышала эффективность эталона в норме внесения 2 л/га.

Важно подчеркнуть, что пеларгоновая кислота не обладает почвенным действием и оказывает влияние на сорные растения по типу контактных, а не системных гербицидов. В этой связи интерес представляет сравнение показателей учета массы сорных растений в обработанных вариантах и контроле, где сорные растения продолжали рост и развитие в течение всего

периода наблюдений, а также появлялись новые всходы сорняков.

Сравнение эффективности пеларгоновой кислоты и эталона при проведении количественных учетов засоренности подтвердило преимущество первой при учете массы сорных растений (табл. 2).

В отношении снижения массы однолетних двудольных сорняков эффективность пеларгоновой кислоты при нормах внесения 21, 35 и 49 л/га в среднем в опыте составила 90–96–98% соответственно (против 84–90% при использовании эталона 1–2 л/га). Похожие показатели отмечены и в отношении действия препаратов на массу однолетних злаковых сорняков: 89–94–96% против 85–92%. Наиболее ярко преимущество пеларгоновой кислоты над эталоном проявилось в отношении действия препаратов на массу многолетних двудольных сорняков: 83–88–89% против 61–81%.

В опыте присутствовали представители 3-х групп сорных растений: 1 – однолетние злаковые (овес пустой – *Avena fatua* L. (AVEFA – согласно ЕРРОCode – коду Европейско-средиземноморской организации по защите растений), просо

**Таблица 2.** Снижение массы сорных растений в посевах сельскохозяйственных культур после использования пеларгоновой кислоты (525 г/л) (средние величины учетов через 15 и 30 сут после внесения, 2022–2023 гг.), % к контролю

Вариант	Группы сорняков*	Алтайский край, подсолнечник		Саратовская обл., соя		Волгоградская обл., кукуруза	
		2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.
Пеларгоновая кислота, 21 л/га	ОДС	71.5	80.5	99.1	97.2	93.7	95.2
	МДС	50.5	–	83.2	96.2	87.3	95.6
	ОЗС	86.5	82.5	91.9	91.9	88.4	92.3
35 л/га	ОДС	94.0	91.0	99.4	97.1	95.6	96.5
	МДС	64.0	–	88.5	100	90.9	97.2
	ОЗС	100	92.0	96.5	93.2	91.0	93.4
49 л/га	ОДС	100	100	96.6	98.5	95.9	97.6
	МДС	96.0	–	97.4	100	100	100
	ОЗС	100	97.0	97.0	94.5	92.2	94.4
Суховой, ВР 1 л/га	ОДС	53.0	71.0	98.8	93.6	92.6	93.0
	МДС	47.5	–	53.4	61.5	58.6	79.2
	ОЗС	67.0	80.0	100	91.9	77.9	92.3
Суховой, ВР 2 л/га	ОДС	81.5	75.5	95.4	95.4	95.9	95.4
	МДС	86.0	–	67.2	85.2	71.8	93.2
	ОЗС	84.0	90.5	98.5	93.2	88.7	94.4
Контроль**	ОДС	58.5	20.5	122.0	170.0	136.0	197.5
	МДС	62.0	0	142.5	223.0	197.5	220.0
	ОЗС	33.0	395.0	23.5	28.0	29.0	34.0

\* ОДС – однолетние двудольные сорняки, МДС – многолетние двудольные сорняки, ОЗС – однолетние злаковые сорняки.

\*\* Приведены абсолютные показатели массы сорных растений в необработанном контроле (г/м<sup>2</sup>).

**Таблица 3.** Эффективность пеларгоновой кислоты (525 г/л) против видов сорных растений (среднее, 2022–2023 гг.)

Вид сорных растений	Снижение количества сорняков, % к контролю					
	пеларгоновая кислота, норма применения, л/га					
	21		35		49	
	время после обработки, сут					
	15	30	15	30	15	30
CAPBP	100	100	100	100	100	100
THLAR	100	100	100	100	100	100
SINAR	100	100	100	100	100	100
POLCO	100	77.5	100	100	100	90
AVEFA	83	89	100	100	100	100
AMARE	97.3	90.8	100	82.8	93.8	86.5
PANMI	82	85	94	94	98	98
SETPU	90.2	87.6	94.5	87.2	95.6	90.1
CHEAL	82.6	74.4	87.2	88.8	100	96.6
ECHCG	78	82	86	88	94	94
SONAR	87.5	71	87.5	71	100	100
LACTT	83.5	54	83.5	83.5	100	83.5
DESSO	50	50	83	83	100	100
CIRAR	0	33	50	66	100	66
ARTSI	0	0	50	50	100	100

сорное – *Panicum miliaceum* ssp. *runderale* (Kitag.) Tzvelev (PANMI), щетинник сизый – *Setaria pumila* (Poir.) Roem. & Schult. (SETPU) и ежовник обыкновенный – *Echinochloa crus-galli* (L.) P. Beauv. (ECHCG)); 2 – малолетние двудольные (марь белая – *Chenopodium album* L. (CHEAL), щирица запрокинутая – *Amaranthus retroflexus* L. (AMARE), гречишка вьюнковая – *Fallopia convolvulus* (L.) A. Love (POLCO), горчица полевая – *Sinapis arvensis* L. (SINAR), ярутка полевая – *Thlaspi arvense* L. (THLAR), пастушья сумка обыкновенная – *Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik. (CAPBP), полынь Сиверса – *Artemisia sieversiana* Willd. (ARTSI) и дескурация Софьи – *Descurainia sophia* (L.) Webb ex Prantl (DESSO)); 3 – многолетние двудольные (осот полевой – *Sonchus arvensis* L. (SONAR), латук татарский – *Lactuca tatarica* (L.) C.A. Mey. (LACTT) и бодяк полевой – *Cirsium arvense* (L.) Scop. (CIRAR)) (табл. 3).

Анализ чувствительности отдельных видов сорных растений к действию пеларгоновой кислоты (525 г/л) показал, что все присутствовавшие в опытах сорняки были высокочувствительными к обработке этим гербицидом. Через 15 сут после ее внесения в норме 49 л/га гибель щирицы запрокинутой и таких злаковых сорняков, как просо сорное, щетинник сизый и ежовник обыкновенный, была на уровне 94–98%, гибель всех остальных видов составляла 100%. К 30-м сут после проведения обработки в этом варианте наблюдали появление всходов таких видов сорных растений, как гречишка вьюнковая, щирица

запрокинутая, щетинник сизый, марь белая, латук татарский и бодяк полевой.

Такие виды сорных растений, как овес пустой и щирица запрокинутая, полностью погибли при использовании пеларгоновой кислоты (525 г/л) в норме применения 35 л/га, а такие виды, как пастушья сумка обыкновенная, ярутка полевая, горчица полевая и гречишка вьюнковая, погибли даже при внесении пеларгоновой кислоты (525 г/л) в норме 21 л/га.

Из всего спектра встречающихся в опыте видов сорных растений относительную устойчивость к действию пеларгоновой кислоты (и то лишь при ее использовании в минимальной норме 21 л/га) проявили только 2 вида: полынь Сиверса и бодяк полевой. При этом использование гербицида в средней норме применения 35 л/га обеспечивало эффективность против названных видов на уровне 50%, а максимальная норма применения обеспечивала повышение эффективности обработки до 100%.

В подавляющем большинстве вариантов (за исключением варианта с подсолнечником в 2022 г., где различия были статистически недостоверными) после использования пеларгоновой кислоты было отмечено достоверное увеличение урожая сельскохозяйственных культур по сравнению с необработанным контролем (табл. 4).

Урожайность сои сорта Марина в контроле без обработки в 2022 г. составляла 18.2, в 2023 г. – 16.4 ц/га.

**Таблица 4.** Урожайность сельскохозяйственных культур после применения пеларгоновой кислоты (525 г/л) (2022, 2023 гг.), ц/га

Вариант	Соя		Кукуруза		Подсолнечник	
	сорт Марина		гибрид ЕС Катамаран	гибрид РНИИСК 1	сорт Енисей	
	2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.	2022 г.	2023 г.
Пеларгоновая кислота, 21 л/га	20.4	19.2	55.5	48.0	10.2	10.1
35 л/га	20.3	19.1	54.5	48.2	10.8	11.4
49 л/га	20.5	19.3	57.7	49.0	11.2	12.5
Суховой, ВР 1 л/га	20.1	19.0	53.5	47.0	10.3	10.7
Суховой, ВР 2 л/га	20.3	19.2	56.5	47.7	10.8	11.3
Контроль	18.2	16.4	34.5	27.5	10.9	6.0
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	0.3	0.3	3.1	3.0	2.2	2.8

При этом в первый год исследования величина урожая, сохраненного вследствие уничтожения сорных растений внесением пеларгоновой кислоты (525 г/л) в нормах 21–49 л/га, превышала контроль на 11.2–12.6%, а при использовании эталона – на 10.4–11.2%. Во 2-й год исследования прибавки урожайности в вариантах с применением пеларгоновой кислоты (525 г/л) составили 16.5–17.7, при внесении эталона – 15.9–17.1%.

Следует отметить, что в оба года исследования урожайность сои в варианте с максимальной нормой применения пеларгоновой кислоты (525 г/л) 49 л/га была достоверно больше не только урожайности в контроле, но и в варианте применения эталона Суховой, ВР 1 л/га.

Аналогичная тенденция была отмечена и при анализе данных урожайности кукурузы в первый год исследования: наибольшая прибавка урожайности (67.2%) была отмечена при использовании максимальной нормы применения пеларгоновой кислоты (525 г/л) 49 л/га. Она не только достоверно превышала контроль (как и другие варианты с обработкой), но и была достоверно больше урожайности, полученной при внесении эталона Суховой, ВР 1 л/га. На следующий год во всех вариантах с гербицидами были отмечены статически значимые прибавки урожайности (70.9–78.2%).

Достоверное увеличение урожайности подсолнечника после применения гербицидов было отмечено во 2-й год исследования, при этом урожайность во всех вариантах с их применением находилась на одинаково высоком уровне (прибавки составили от 68.3 до 108%).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, полученные данные позволили констатировать высокую эффективность использования пеларгоновой кислоты (525 г/л) в качестве гербицида до появления всходов подсолнечника, сои

и кукурузы. В среднем при внесении препарата в норме 21 л/га снижение общей засоренности посевов составило 87%. С увеличением нормы применения препарата до 35 и 49 л/га его эффективность возрастала до 93 и 96% соответственно.

В целом эффективность пеларгоновой кислоты в норме внесения 21 л/га превышала эффективность эталона Суховой, ВР 1 л/га и приближалась к эффективности варианта эталона Суховой, ВР 2 л/га, а эффективность норм 35 и 49 л/га превышала эффективность эталона Суховой, ВР 2 л/га.

Все присутствовавшие в опыте виды сорных растений были высокочувствительными к обработке пеларгоновой кислотой (525 г/л). Через 15 сут после обработки в норме 49 л/га гибель щирицы запрокинутой и таких злаковых сорняков, как просо сорное, щетинник сизый и ежовник обыкновенный, была на уровне 94–98%, гибель всех остальных видов сорных растений составила 100%. Наименее чувствительными к действию пеларгоновой кислоты в минимальной норме применения 21 л/га были польнь Сиверса и бодяк полевой.

Снижение засоренности после использования пеларгоновой кислоты обеспечивало достоверное увеличение урожая сельскохозяйственных культур по сравнению с необработанным контролем. Прибавки урожая сои достигали 17.7, кукурузы – 78.2, подсолнечника – 108%.

Практическое использование пеларгоновой кислоты (525 г/л) на полях, предназначенных под посев подсолнечника, сои и кукурузы, станет возможным после получения соответствующего свидетельства о регистрации препарата на территории Российской Федерации.

Автор выражает благодарность всем сотрудникам, задействованным в проведении полевых опытов: Г.Я. Стецову, А.И. Силаеву, Б.Г. Стаченкову и другим.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чуманова Н.Н., Гребенникова В.В. Влияние минимально-нулевых систем обработки почвы на засоренность зерновых агрофитоценозов // Вестн. Алтай. ГАУ. 2013. № 9(107). С. 14–17.
2. Борин А.А., Лощинина А.Э. Влияние агротехнологий на засоренность посевов и урожайность культур севооборота // Защита и карантин раст. 2019. № 6. С. 15–17.
3. Маханькова Т.А., Долженко В.И., Голубев А.С. Формирование ассортимента гербицидов в России // Агрохимия. 2022. № 11. С. 50–61.
4. Немченко В.В., Филиппов А.С., Заргарян А.М. Применение общеистребительных гербицидов при минимальной и нулевой технологиях возделывания зерновых культур // Защита и карантин раст. 2015. № 11. С. 22–24.
5. Стецов Г.Я., Садовникова Н.Н. Применение Раундапа в паровом поле для борьбы с вьюнком полевым (*Convolvulus arvensis* L.) // Вестн. Алтай. ГАУ. 2013. № 8(106). С. 5–7.
6. Голубев А.С., Маханькова Т.А. Перспективы борьбы с сорняками без глифосата // Новые и нетрадиц. раст. и перспективы их использования. 2018. № 13. С. 504–506.
7. Голубев А.С., Берестецкий А.О. Перспективные направления использования биологических и биорациональных гербицидов в растениеводстве России // Сел.-хоз. биол. 2021. Т. 56. № 5. С. 868–884.
8. Webber C.L., Taylor M.J., Shrefler J.W. Weed control in yellow squash using sequential postdirected applications of pelargonic acid // Hort Technol. 2014. V. 24. P. 25–29.
9. Pannacc, E., Ottavini D., Onofri A., Tei F. Dose-response curves of pelargonic acid against summer and winter weeds in central Italy // Agronomy. 2022. V. 12. P. 3229.
10. Ogbangwor N., Söchting H.-P. Studies on the efficacy of pelargonic acid for weed control // Tagungsband: 30. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung. 2022. V. 468. P. 424–431.
11. Loddo D., Jagarapu K.K., Strat E., Trespidi G., Nikolić N., Masin R., Berti A., Otto S. Assessing herbicide efficacy of pelargonic acid on several weed species // Agronomy. 2023. V. 13. P. 1511.
12. Campos J., Mansour P., Verdeguer M., Baur P. Contact herbicidal activity optimization of methyl capped polyethylene glycol ester of pelargonic acid // J. Plant Dis. Protect. 2023. V. 130. P. 93–103.
13. Государственный каталог пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации. М., 2023. 876 с.
14. Голубев А.С., Маханькова Т.А. Методические рекомендации по проведению регистрационных испытаний гербицидов. СПб.: ВИЗР, 2020. 80 с.
15. Методические указания по регистрационным испытаниям гербицидов в сельском хозяйстве / Под ред. В.И. Долженко. СПб.: МСХ, РАСХН, ВИЗР, 2013. 280 с.

## Effectiveness of Pelargonic Acid as a Herbicide in Sunflower, Soybean and Corn Crops

A. S. Golubev<sup>#</sup>

All-Russian Institute of Plant Protection,  
Shosse Podbelsky 3, St. Petersburg–Pushkin 196608, Russia

<sup>#</sup>E-mail: golubev100@mail.ru

The increase in field contamination due to the spread of minimal and zero tillage technologies requires protective measures using chemical pesticides. Due to the limitations of the use of glyphosate in the assortment, there is a vacant niche for new herbicides capable of having a general destructive effect. In field small-scale experiments conducted during the 2022 and 2023 seasons, in sunflower crops of the Yenisei variety, soybeans of the Marina variety and corn hybrids of the EU Catamaran and RNIISK 1, high efficiency of the use of pelargonic acid (525 g/l) as a herbicide before the emergence of crops was established. On average, when applying 21 l/ha of the acid, the reduction in total weed contamination was 87, 35 l/ha – 93, 49 l/ha – 96%, respectively. All weed species present in the experiment were highly sensitive to pelargonic acid (525 g/l). 15 days after its introduction at a rate of 49 l/ha, the reduction of amount of the redroot pigweed and such cereal weeds as millet, gray bristle, and barnyard millet was at the level of 94–98%, the reduction of amount of all other weed species was 100%. The reduction of clogging after the application of pelargonic acid led to a significant increase in crop yields compared with the untreated control. The increase in soybean yield reached 17.7, corn – 78.2, sunflower – 108%.

**Keywords:** weeds, herbicides, pelargonic acid, efficiency, sunflower, soy, corn.

УДК 632.95

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ФУНГИЦИДНОЙ И БАКТЕРИЦИДНОЙ АКТИВНОСТИ 3-АЛКИЛЗАМЕЩЕННЫХ 1*H*-ФОСФОЛАН ОКСИДОВ<sup>§</sup>

© 2024 г. Т. В. Тюмкина<sup>1,\*</sup>, К. А. Булатова<sup>2</sup>, Д. Н. Исламов<sup>1</sup>, А. Л. Махаматханова<sup>1</sup>,  
М. И. Маллябаева<sup>2</sup>, Д. Ш. Сабилов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт нефтехимии и катализа Уфимского федерального исследовательского центра РАН  
450075 Уфа, просп. Октября, 141, Россия

<sup>2</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет  
450062 Уфа, ул. Космонавтов, 1, Россия

\*E-mail: tvnmr@gmail.com

Проведено тестирование фунгицидной и бактериальной активности модельного соединения 3-гексил-1*H*-фосфолан оксида с использованием грибов рода *Septoria* sp., *Phytophthora* sp., *Puccinia* sp. и *Aspergillus* sp., а также бактерии *Escherichia coli*. Комплексный анализ полученных экспериментальных данных и докинга на выбранных мишенях ключевых белков каждого из тест-объектов позволил оценить потенциальную пестицидную активность класса фосфоланоксидов.

**Ключевые слова:** 1*H*-фосфолан оксиды, фунгицидная активность, бактерия *Escherichia coli*, докинг.

**DOI:** 10.31857/S0002188124080092, **EDN:** CDPBOV

### ВВЕДЕНИЕ

Фосфорорганические соединения (ФОС) обладают широким спектром биологической активности, благодаря чему находят применение в медицине, в сельском хозяйстве в качестве пестицидов и т.п. Преимуществом фосфорсодержащих фунгицидов, по сравнению с хлорсодержащими, является профилактическое и лечащее действие, что позволяет использовать их для протравливания и опрыскивания растений во время вегетации. В настоящее время широко используют практически единственный фунгицид фосэтил алюминия (препараты Афуган, Альетт, Превикур Энерджи и др.), обладающий высокой системностью против мучнистой росы, снежной плесени, корневых гнилей (рис. 1), хотя он и является малоэффективным против фитофтороза, например, томата и картофеля. Считается, что вещество не влияет непосредственно на фитопатоген, а усиливает защитные реакции самого растения, ускоряя процесс образования фенольных соединений, токсичных для грибов [1].

В качестве фунгицидов для защиты зерновых и цитрусовых культур рекомендованы некоторые фосфорсодержащие инсектициды как системного

(Ипробенфос, Фенитротрион, Фозалон), так и контактного (Диталимфос) действия, применение которых в качестве инсектицидов ограничено вследствие их высокой токсичности.

Таким образом, при всех преимуществах применения ФОС существует ограниченное количество известных фунгицидов на их основе. Перспективными могут являться устойчивые к окислению соединения пентавалентного фосфора, в структуре которых присутствует группа P(O)H (рис. 1), аналогично структурному фрагменту фунгицида фосэтил алюминия. К ним относятся замещенные 1*H*-фосфолан оксиды, синтез которых был недавно нами разработан в одну препаративную стадию из доступных реагентов – α-олефинов, триэтилалюминия и трихлорида фосфора, в мягких условиях, с высокими выходами, что делает этот метод перспективным для практического применения [2, 3]. На сегодняшний день известно ограниченное количество подобных соединений циклической структуры [4], и, как следствие, биологическая активность данного класса остается малоизученной. Следует также отметить, что сообщалось о противораковых свойствах некоторых представителей подобных ФОС [5].

С целью оценки фунгицидной активности новых 3-замещенных 1*H*-фосфолан оксидов провели исследование фунгицидной и бактериальной активности модельного соединения 3-гексил-1*H*-фосфолан

<sup>§</sup> Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (темы № FMRS-2022-0074 и № FMRS-2022-0075).

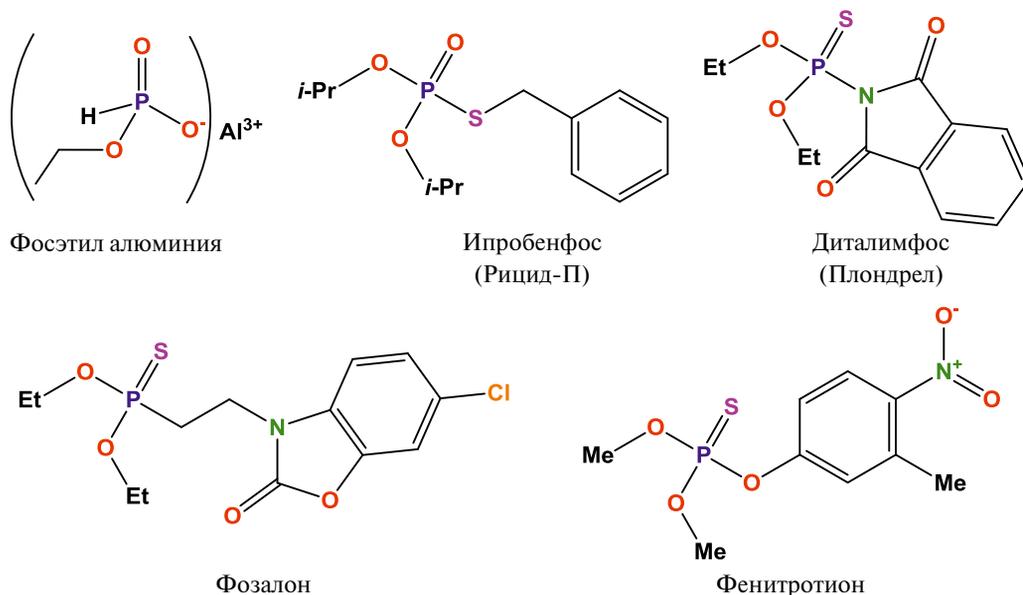


Рис. 1. Структура известных фосфорорганических фунгицидов.

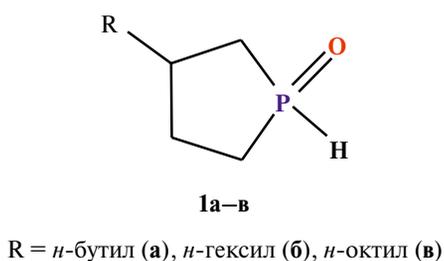


Рис. 2. Объекты исследования.

оксида с использованием грибов родов *Septoria* sp., *Phytophthora* sp., *Puccinia* sp. и бактерии *Escherichia coli*. Комплексный анализ полученных экспериментальных данных и докинга (метода молекулярного моделирования, позволяющего предсказать наиболее выгодную для образования устойчивого комплекса ориентацию и конформацию одной молекулы (лиганда) в сайте связывания другой (рецептора)) на выбранных мишенях ключевых белков каждого из тест-объектов позволил оценить потенциальную пестицидную активность класса фосфоланоксидов (рис. 2).

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Грибной мицелий в эксперименте выращивали на мясопептонном агаре (МПА) в концентрации 37 г/л (30.8 г питательного агара и 0.8 л

дистиллированной воды). После приготовления среду автоклавировали при 120°C в течение 20 мин. В качестве стандартных соединений в экспериментах с тест-штаммами грибов использовали коммерческий фунгицид “Агролекарь” (ООО “МосАгро”), содержащий 25% д.в. (пропиконазол) в рекомендованной производителем концентрации 0.07% (7 мл/10 л раствора), в экспериментах с бактерией *Escherichia coli* использовали препарат “Цефазолин” для внутривенного и внутримышечного введения (д.в. — цефазолин натрия в пересчете на цефазолин — 1.0 г) в концентрации 0.2% (1 г/4 мл воды для инъекций). Исследованное соединение 3-гексил-1*H*-фосфолан оксид **16** синтезировано согласно разработанной нами методике [2, 3].

Фитопатогенные грибы выделены из пораженных грибами листьев растений и продуктов: грибы рода *Septoria* sp. — из пораженных листьев терновника (*Prúnus spinósa*), *Phytophthora* sp. — из пораженных листьев томата (*Solánum lycopérsicum*), *Puccinia* sp. — из пораженных листьев смородины черной (*Ríbes nígrum*), *Aspergillus* sp. — с пораженной поверхности томатной пасты. Штамм бактерий *Escherichia coli* взят из коллекции ФГБОУ ВО УГНТУ (лаборатория кафедры “Прикладная экология”).

Изучение фунгицидной активности соединений проводили согласно методике [6] при использовании в качестве растворителя дистиллированной воды в разведении 200 мг/мл и 400 мг/мл. Опыты проводили “двойным слепым” методом,

**Таблица 1.** Протеины грибов и бактерий, выбранные в качестве мишеней для докинга

Царство	Биологический вид	Мишень	PDBID
Грибы	<i>Aspergillus fumigatus</i>	Цитохром P450 (CYP51B)	4UYM
	<i>Aspergillus nidulans</i>	Хитиндеацетилаза (AnCDA)	2Y8U
	<i>Aspergillus niger</i>	Хитиндеацетилаза (AngCDA)	7BLY
	<i>Aspergillus parasiticus</i>	Тиоэстераза (TE)	3ILS
	<i>Phytophthora cryptogea</i>	В-Криптогейн (CRY)	1BXM
	<i>Phytophthora infestans</i>	L-треонин-3-дегидрогеназа (L-ThrDH)	6JYG
Бактерии	<i>Escherichia coli</i>	Пенициллинсвязывающий белок 5 (PBP 5)	1Z6F
		Орнитинтранскарбамилаза (OTC)	1DUV
		Цитидинтрифосфат-синтаза (СТР)	1S1M
		$\beta$ -Лактамаза (AmpC)	1XGJ

с применением луночно-диффузионного метода [7]. Среду для культивирования в объеме 20–25 мл вносили в чашки Петри ( $d = 90$  мм). После застывания МПА и посева биоматериала по центру чашки Петри с помощью насадок делали лунки ( $d = 10$  мм) на 2/3 толщины слоя агара и засеивали соответствующие штаммы грибов и бактерий. Исследованные и стандартные вещества вносили в лунки в объеме 0.1 мл. После инкубирования грибов и бактерий в термостате при  $29 \pm 0.5^\circ\text{C}$  в течение 24 ч рассчитывали активность исследованных веществ согласно методике [6]. Зоны подавления роста грибов и бактерий измеряли в миллиметрах. Минимальную ингибирующую концентрацию (МИК) определяли методом серийных разведений [8]. Повторность опыта трехкратная.

В теоретической части поиск потенциальных белков-мишеней, имеющих отношение к бактерии *Escherichia coli*, проведен с использованием базы данных фармакофорных моделей PharmMapper [9]. В результате в рассмотрение были взяты протеины 1DUV, 1S1M и 1XGJ (табл. 1). Энзимы 2Y8U, 7BLY, 3ILS, 1BXM и 6JYG выбраны на основе литературных данных [10–13].

Протеины 4UYM и 1Z6F включены в исследование, поскольку цитохромы и пенициллинсвязывающие белки являются установленными мишенями для пропиконазола и цефазолина соответственно [14–16]. Для докинга использовали программный пакет AutoDock 4 [17]. Дополнительный анализ и визуализацию результатов докинга проводили с применением программного обеспечения Discovery Studio Visualizer v21.1.0.20298 [18]. Кристаллографические структуры комплексов CYP51B/вориконазол, AnCDA/фосфат-ион, AngCDA/малонат-ион, CRY/аргостерол, L-ThrDH/NAD (никотинамидадениндинуклеотид), PBP5/BO9 (N1-[(1R)-1-(дигидроксиборил)этил]-N2-[(трет-бутоксикарбонил)-D-гамма-глутамил]-N6-[(бензилокси)карбонил-L-лизинамид]), OTC/PSQ

(Nдельта-(N'-сульфодиаминофосфинил)-L-орнитин), AmpC/HTC (3-(4-карбоксо-2-гидроксифенилсульфамойл)тиофен-2-карбоновая кислота) и протеинов TE, СТР были получены из банка данных белков (идентификаторы PDB: 4UYM, 2Y8U, 7BLY, 1BXM, 6JYG, 1Z6F, 1DUV, 1XGJ, 3ILS, 1S1M) [19] и оптимизированы посредством удаления молекул воды. Рецепторная сетка, как правило, располагалась вокруг активного сайта сокристаллизованных лигандов. В случае белков TE и СТР активный сайт определен на основе литературных данных [11, 20].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первоначально экспериментальная оценка фунгицидной и бактерицидной активности 3-гексил-1H-фосфофан оксида **16** была проведена при концентрации вещества 400 мг/мл (табл. 2).

Наблюдала значительное (в 2–3 раза) увеличение диаметра ингибирования для всех видов исследованных грибов по сравнению с препаратом сравнения, кроме *Septoria* sp., чья фунгицидная активность оказалась близка с действием препарата “Агролекар”, взятом в рекомендованной производителем концентрации пропиконазола. При уменьшении концентрации вещества до 200 мг/мл фунгицидная активность в отношении всех видов исследованных грибов сохранялась. Для грибов *Aspergillus* sp. и *Phytophthora* sp. зафиксировано двукратное уменьшение зоны ингибирования.

С целью определения минимальной ингибирующей концентрации (МИК) 3-гексил-1H-фосфофан оксида **16** были проведены эксперименты при концентрациях 100 мг/мл вещества и меньше, которые показали полное отсутствие ингибирования (табл. 3).

Установлено, что исследованное соединение также обладало бактерицидной активностью по отношению к бактериям *Escherichia coli*, сравнимое

**Таблица 2.** Фунгицидная и бактерицидная активность различных препаратов на объекты исследования

Объект исследования	Диаметр ингибирования роста тест-культур, см			
	“Агролекарь”	3-гексил-1 <i>H</i> -фосфофан оксид (200 мг/мл)	3-гексил-1 <i>H</i> -фосфофан оксид (400 мг/мл)	“Цефазолин”
<i>Aspergillus</i> sp.	1	1.3	3.5	—
<i>Septoria</i> sp.	4	3.2	3.2	—
<i>Phytophthora</i> sp.	1.3	2.5	4.0	—
<i>Puccinia</i> sp.	2.1	4	4.6	—
<i>Escherichia coli</i>	—	5	5.3	7.1

**Таблица 3.** Минимальная ингибирующая концентрация 3-гексил-1*H*-фосфофан оксида **1б**, мг/мл

Разведение	Концентрация, мг/мл	<i>Septoria</i> sp.	<i>Phytophthora</i> sp.	<i>Puccinia</i> sp.	<i>Aspergillus</i> sp.	<i>Escherichia coli</i>
1 : 10	400	—	—*	—*	—*	—
1 : 100	200	—*	+	+	+	—*
1 : 10 <sup>3</sup>	100	+	+	+	+	+
1 : 10 <sup>4</sup>	50	+	+	+	+	+
1 : 10 <sup>5</sup>	25	+	+	+	+	+
1 : 10 <sup>6</sup>	12.5	+	+	+	+	+

Примечание. Прочерк – нет роста, + – видимый рост.

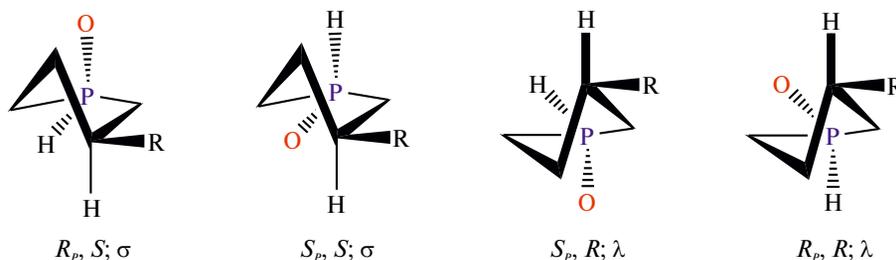
\* МИК для соответствующих тест-штаммов.

с известным высокоактивным препаратом “Цефазолин”, при этом МИК составляло 200 мг/мл (табл. 2, 3). Таким образом, установлено, что исследованное вещество **1б** обладало как фунгицидной, так и бактерицидной активностью.

С целью более глубокого понимания механизма действия синтезированного фосфофан оксида было проведено теоретическое моделирование взаимодействия возможных стереоизомеров соединений **1а–в** с известными для данных грибов и бактерии мишенями (табл. 1). Установлено, что для 3-бутил-1*H*-фосфофан оксида **1а** преимущественно реализуется “твист” конформация с экваториальным

расположением заместителя в 3-м положении, что согласуется с литературными данными для аналогичных алюминий содержащих систем [21]. Таким образом, для каждого из фосфофан оксидов **1а–в** были оптимизированы структуры 4-х диастереомеров (рис. 3), из которых *RR*- $\lambda$  и *SS*- $\sigma$  диастереомеры оказались наиболее энергетически выгодными и были выбраны в качестве лигандов для проведения докинга (табл. 4). В случае пропиконазола докинг проводили с участием наиболее термодинамически выгодного *SR*-стереоизомера.

Для некоторых протеинов существуют экспериментальные данные с сокристаллизованными



R = *n*-бутил (**а**), *n*-гексил (**б**), *n*-октил (**в**)

**Рис. 3.** Диастереомеры 3-алкил-1*H*-фосфофан оксидов.

**Таблица 4.** Относительные величины термодинамических параметров ( $[S] = \text{Дж}/(\text{моль К})$ ;  $[H] = [G] = \text{кДж}/\text{моль}$ ) стереоизомеров пропиконазола, фосфолан оксидов **1a–в** в стандартных условиях

Соединение	Диастереомер	$\Delta H$	$\Delta G$	$\Delta S$
Пропиконазол	<i>RR</i>	6.78	4.56	36.48
	<i>RS</i>	5.69	14.35	0.00
	<i>SR</i>	0.00	0.00	29.04
	<i>SS</i>	5.27	7.11	22.84
<b>1a</b>	<i>RR-λ</i>	0.00	0.00	3.39
	<i>RS-σ</i>	0.59	1.38	0.63
	<i>SR-λ</i>	0.59	1.17	1.34
	<i>SS-σ</i>	0.04	0.13	3.01
<b>1б</b>	<i>RR-λ</i>	0.00	0.00	1.76
	<i>RS-σ</i>	0.46	0.63	1.13
	<i>SR-λ</i>	0.63	1.13	0.00
	<i>SS-σ</i>	0.00	0.08	1.51
<b>1в</b>	<i>RR-λ</i>	0.00	0.00	2.72
	<i>RS-σ</i>	0.71	1.55	0.00
	<i>SR-λ</i>	0.54	0.54	2.76
	<i>SS-σ</i>	0.00	0.13	2.34

**Таблица 5.** Конформация с наименьшей энергией для каждого сокристаллизованного лиганда

Протеин	Лиганд	RMSD	FBE, ккал/моль	FIE, ккал/моль	Ki
CYP51B	Вориконазол	1.366	-8.29	-10.08	832.06 нМ
AnCDA	Фосфат-ион	0.937	-2.00	-2.00	34.27 мМ
AngCDA	Малонат-ион	12.239	-3.17	-3.76	4.79 мМ
CRY	Эргостерол	1.443	-11.92	-13.41	1.83 нМ
L-ThrDH	NAD	1.503	-2.54	-4.33	13.73 мМ
PBP 5	BO9	2.717	-4.98	-11.24	224.24 мкМ
OTC	PSQ	1.039	-11.49	-14.47	3.81 нМ
AmpC	HTC	6.279	-7.45	-9.24	3.48 мкМ

Примечание. FBE – свободная энергия связывания, FIE – конечная межмолекулярная энергия, Ki – константа ингибирования. То же в табл. 6.

лигандами (табл. 5), которые представлены в табл. 6 для сопоставления с теоретическими результатами докинга с участием соединений **1a–в**.

Как следует из табл. 6, фунгицидная активность пропиноказола и 3-октил-1*H*-фосфолан оксида **1в** сопоставима для каждого из потенциальных белков мишеней, поскольку их расчетные константы ингибирования Ki одного порядка, например, константы ингибирования Ki пропиноказола, вориконазола и соединения **1в** для белка мишени CYP51B (*Aspergillus fumigatus*) составляют 10<sup>-9</sup> (нМ) размерность. Более того, как показал сравнительный анализ величин констант связывания и констант ингибирования, оценочная ингибирующая активность **1в** даже больше по сравнению с пропиконазолом (132.17 нМ < 101.18 нМ (Ki) и -9.38 < 9.54 (FBE)). Согласно полученным результатам, гомологи **1a**

и **1б** с меньшим количеством звеньев в алкильной цепи должны проявлять меньшую активность, например, для **1a** *SS* конфигурации Ki = 22.66 мкМ. Наблюдаемое увеличение активности с увеличением длины цепи в ряду гомологов свидетельствовало о значительной роли алкильного фрагмента 1*H*-фосфолан оксида в связывании с активными сайтами данного белка. Для подтверждения полученных результатов, а также с целью детализации взаимодействий, реализующихся в системе молекула-протеин, визуализировали некоторые результаты докинга (рис. 4).

Действительно, алкильный заместитель участвует в образовании гидрофобных взаимодействий, причем если для **1a** наблюдали один такой контакт, то для **1б** соединения – уже четыре, и в случае **1в** проявлялись 5 взаимодействий (розовый цвет

Таблица 6. Конформация с наименьшей энергией для пропиконазола, цефазолина, фосфофан оксидов **1a–в**

Протеин	Лиганд	FBE, ккал/моль	FIE, ккал/моль	Ki
CYP51B	Пропиконазол <b>SR</b>	-9.38	-10.88	132.17 нМ
	<b>1a RR-λ</b>	-6.76	-7.65	11.15 мкМ
	<b>1a SS-σ</b>	-6.34	-7.23	22.66 мкМ
	<b>1b RR-λ</b>	-7.96	-8.86	1.46 мкМ
	<b>1b SS-σ</b>	-7.84	-8.74	1.78 мкМ
	<b>1в RR-λ</b>	-9.31	-10.20	150.62 нМ
	<b>1в SS-σ</b>	-9.54	-10.44	101.18 нМ
AnCDA	Пропиконазол	-7.01	-8.50	7.25 мкМ
	<b>1a RR-λ</b>	-5.47	-6.36	98.06 мкМ
	<b>1a SS-σ</b>	-5.39	-6.29	111.35 мкМ
	<b>1b RR-λ</b>	-6.20	-7.10	28.33 мкМ
	<b>1b SS-σ</b>	-6.09	-6.99	34.09 мкМ
	<b>1в RR-λ</b>	-7.03	-7.92	7.09 мкМ
AngCDA	<b>1в SS-σ</b>	-6.88	-7.77	9.07 мкМ
	Пропиконазол	-7.00	-8.49	7.44 мкМ
	<b>1a RR-λ</b>	-6.16	-7.05	30.61 мкМ
	<b>1a SS-σ</b>	-5.81	-6.70	55.29 мкМ
	<b>1b RR-λ</b>	-6.92	-7.81	8.52 мкМ
	<b>1b SS-σ</b>	-6.83	-7.73	9.84 мкМ
TE	<b>1в RR-λ</b>	-7.43	-8.32	3.60 мкМ
	<b>1в SS-σ</b>	-7.28	-8.17	4.63 мкМ
	Пропиконазол	-8.73	-10.22	398.20 нМ
	<b>1a RR-λ</b>	-5.82	-6.72	54.08 мкМ
	<b>1a SS-σ</b>	-6.00	-6.89	40.24 мкМ
	<b>1b RR-λ</b>	-6.95	-7.84	8.05 мкМ
CRY	<b>1b SS-σ</b>	-7.20	-8.10	5.25 мкМ
	<b>1в RR-λ</b>	-8.42	-9.31	678.33 нМ
	<b>1в SS-σ</b>	-8.43	-9.33	657.16 нМ
	Пропиконазол	-7.03	-8.52	7.03 мкМ
	<b>1a RR-λ</b>	-5.03	-5.92	206.83 мкМ
	<b>1a SS-σ</b>	-5.11	-6.00	180.63 мкМ
L-ThrDH	<b>1b RR-λ</b>	-6.20	-7.09	28.64 мкМ
	<b>1b SS-σ</b>	-6.13	-7.02	32.29 мкМ
	<b>1в RR-λ</b>	-7.08	-7.98	6.41 мкМ
	<b>1в SS-σ</b>	-7.02	-7.91	7.18 мкМ
	Пропиконазол	-8.30	-9.79	828.38 нМ
	<b>1a RR-λ</b>	-6.13	-7.03	31.90 мкМ
PBP 5	<b>1a SS-σ</b>	-5.94	-6.83	44.28 мкМ
	<b>1b RR-λ</b>	-7.15	-8.04	5.74 мкМ
	<b>1b SS-σ</b>	-7.19	-8.09	5.35 мкМ
	<b>1в RR-λ</b>	-8.40	-9.29	700.62 нМ
	<b>1в SS-σ</b>	-8.19	-9.09	984.87 нМ
	Цефазолин	-11.68	-14.06	2.76 нМ
PBP 5	<b>1a RR-λ</b>	-5.37	-6.26	115.92 мкМ
	<b>1a SS-σ</b>	-5.81	-6.71	54.84 мкМ
	<b>1b RR-λ</b>	-6.44	-7.34	18.96 мкМ

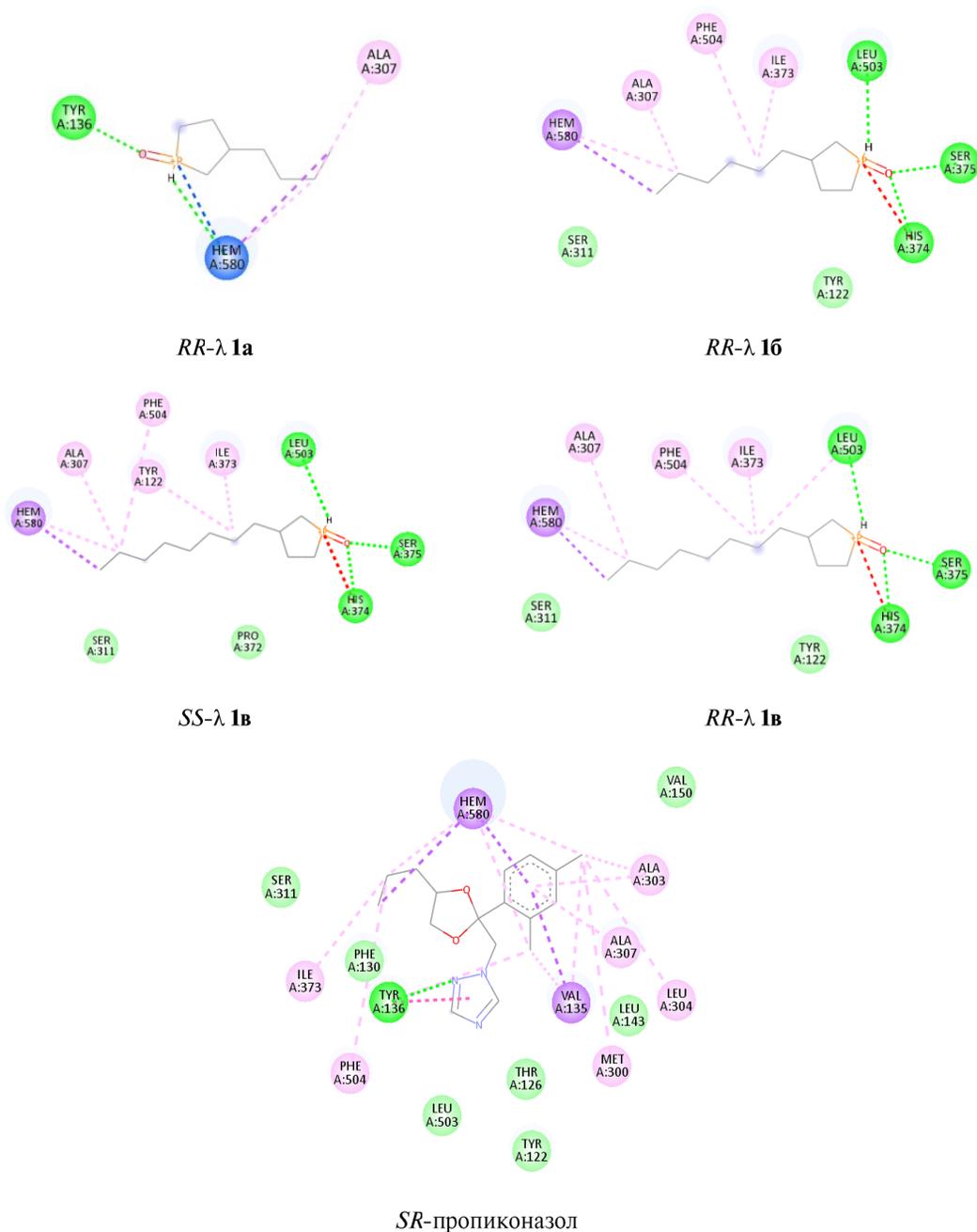
Таблица 6. Окончание

Протеин	Лиганд	FBE, ккал/моль	FIE, ккал/моль	Ki
PBP 5	<b>1b</b> SS- $\sigma$	-6.92	-7.81	8.51 мкМ
	<b>1b</b> RR- $\lambda$	-7.57	-8.47	2.81 мкМ
	<b>1b</b> SS- $\sigma$	-8.06	-8.96	1.23 мкМ
	Цефазолин	-11.13	-13.52	6.89 нМ
	<b>1a</b> RR- $\lambda$	-5.85	-6.75	51.11 мкМ
	<b>1a</b> SS- $\sigma$	-5.93	-6.83	44.99 мкМ
OTC	<b>1b</b> RR- $\lambda$	-7.16	-8.06	5.61 мкМ
	<b>1b</b> SS- $\sigma$	-7.11	-8.01	6.11 мкМ
	<b>1b</b> RR- $\lambda$	-8.09	-8.99	1.17 мкМ
	<b>1b</b> SS- $\sigma$	-8.14	-9.04	1.07 мкМ
	Цефазолин	-9.66	-12.04	83.66 нМ
	<b>1a</b> RR- $\lambda$	-5.05	-5.95	197.60 мкМ
СТР	<b>1a</b> SS- $\sigma$	-5.62	-6.52	75.66 мкМ
	<b>1b</b> RR- $\lambda$	-6.11	-7.01	33.14 мкМ
	<b>1b</b> SS- $\sigma$	-6.64	-7.54	13.47 мкМ
	<b>1b</b> RR- $\lambda$	-6.43	-7.32	19.46 мкМ
	<b>1b</b> SS- $\sigma$	-6.50	-7.40	17.08 мкМ
	Цефазолин	-11.94	-14.33	1.77 нМ
AmpC	<b>1a</b> RR- $\lambda$	-4.80	-5.70	301.97 мкМ
	<b>1a</b> SS- $\sigma$	-4.96	-5.85	232.17 мкМ
	<b>1b</b> RR- $\lambda$	-5.48	-6.38	95.80 мкМ
	<b>1b</b> SS- $\sigma$	-5.77	-6.66	59.45 мкМ
	<b>1b</b> RR- $\lambda$	-6.45	-7.34	18.78 мкМ
	<b>1b</b> SS- $\sigma$	-6.71	-7.61	12.00 мкМ

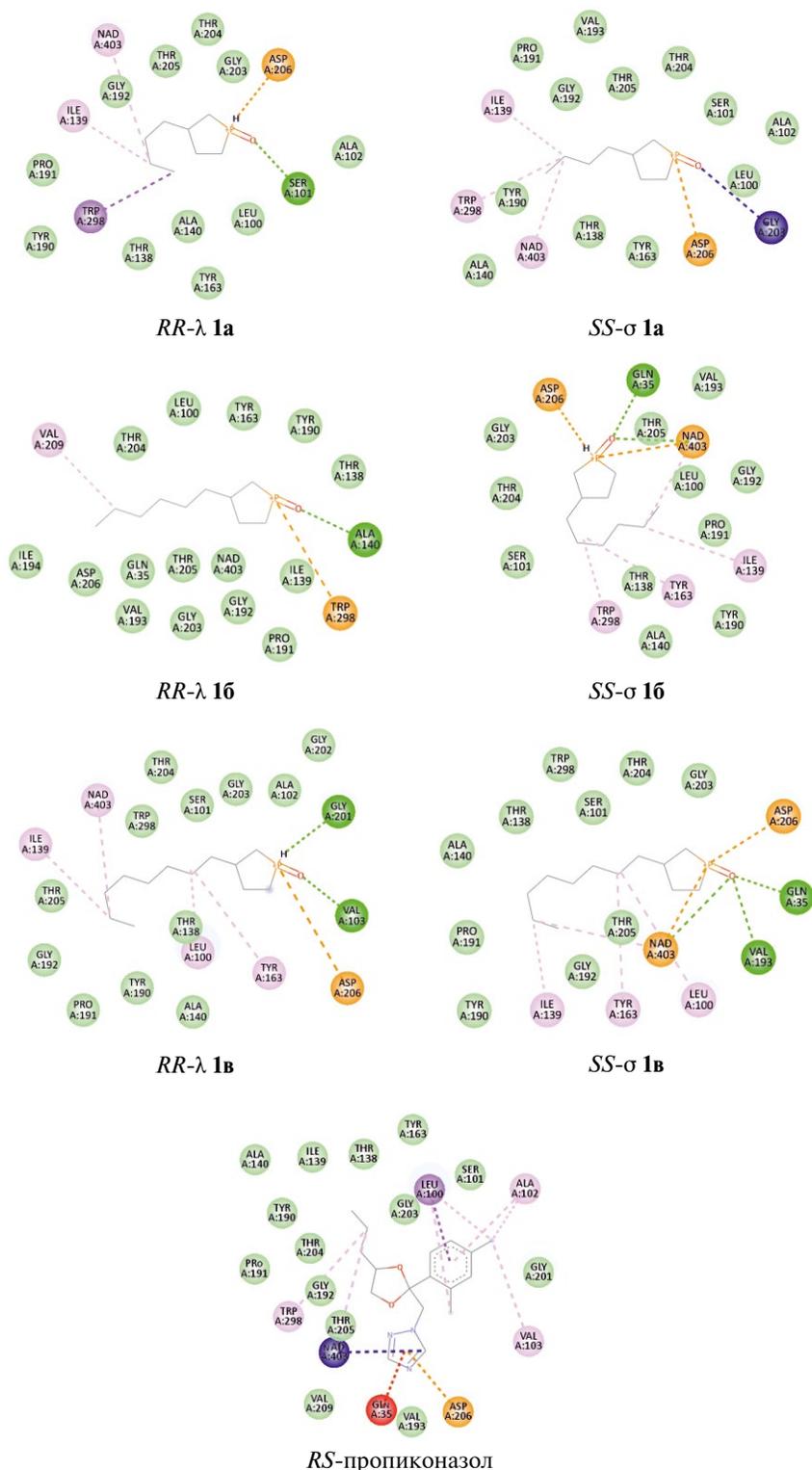
пунктира). Концевая метильная группа в составе алкильного фрагмента ряда соединений **1a–в** участвует также в  $\pi$ - $\sigma$  взаимодействиях (фиолетовый цвет пунктира). Данные 2 типа взаимодействий преобладают в комплексе “пропиноказол–белок CYP51B”. В этом модельном комплексе реализуется также одна водородная связь, в то время как в 1*H*-фосфофан оксидах образуются 2 (**1a**) и 3 (**1b**, **1в**) водородные связи, в которые вовлекаются атомы кислорода и водорода P(O)H функциональной группы. Атом фосфора 1*H*-фосфофан оксидов обеспечивает взаимодействия, обусловленные либо притяжением между противоположно заряженными центрами (см. синий пунктир в **1a**), либо отталкиванием положительно заряженных центров, например, имеет место неблагоприятное взаимное отталкивание зарядов, локализованных на атоме фосфора и протонированном атоме азота боковой цепи аминокислотного остатка His374 (красный цвет пунктирных линий во всех 3-х соединениях (рис. 4). Таким образом, в случае введения **1b** в сайт связывания протеина CYP51B образуется относительно меньше гидрофобных, но больше водородных связей с гемом протеина по сравнению с пропиноказолом. Очевидно, это обусловлено присутствием оксидной функции

при атоме фосфора, что и определяет значительные параметры связывания, и, как следствие, потенциальную фунгицидную активность тестируемых соединений. Анализ расчетных данных, полученных с участием тиюэстеразы (TE) вида *Aspergillus parasiticus* (табл. 1), также показал высокую ингибирующую активность 3-октил-1*H*-фосфофан оксида **1в** ( $K_i = 673.33$  нМ) по сравнению с пропиноказолом ( $K_i = 398.20$  нМ) и, тем более, относительно гомолога 3-гексил-1*H*-фосфофан оксида **1b** ( $K_i = 8.05$  мкМ). Кроме того, фосфофан оксиды показали большую прочность связывания по отношению к данной мишени по сравнению с соединениями, которые тестировали в работе [11]. Тенденция уменьшения величин  $K_i$  с уменьшением длины цепи, а также близкие параметры связывания между модельным и исследованными веществами сохранялись также для комплексов с белками AnCDA и AngCDA.

Теоретические расчеты показали заметное влияние стереохимии на параметры  $K_i$ , FBE, например,  $\Delta K_i(SS-RR) = 49.44$  нМ для **1в** (рис. 4), что свидетельствовало об относительно большей



**Рис. 4.** Взаимодействие SR-пропиконазола и фосфолан оксидов *RR-λ 1a*, *RR-λ 1б* и *RR-λ 1в* с активным сайтом протеина CYP51B. Гидрофобные взаимодействия окрашены в светло-розовый цвет, водородные связи окрашены в зеленый цвет, π-σ взаимодействия окрашены в фиолетовый цвет, Ван-дер-Ваальсовы взаимодействия окрашены в мятно-зеленый цвет, неблагоприятные взаимодействия положительно заряженных центров окрашены в красный цвет, π-π взаимодействия окрашены в розовый цвет. Синим цветом отражено притяжение между противоположно заряженными центрами.



**Рис. 5.** Взаимодействие *RS*-пропиконазола и фосфолан оксидов *RR-λ 1a*, *SS-σ 1a*, *RR-λ 1б*, *SS-σ 1б*, *RR-λ 1в* и *SS-σ 1в* с активным сайтом протеина L-ThrDH. Гидрофобные взаимодействия окрашены в светло-розовый цвет, конвенциональные водородные связи окрашены в зеленый цвет, π-σ взаимодействия окрашены в фиолетовый цвет, Ван-дер-Ваальсовы взаимодействия окрашены в мятно-зеленый цвет, π-анион взаимодействия окрашены в оранжевый цвет, π-π взаимодействия окрашены в розовый цвет, π-донорная водородная связь окрашена в красный цвет, водородные связи с участием атома водорода, ковалентно связанного с атомом углерода, окрашены в синий цвет.



молекулы – 2-х карбонильных групп и 2-х атомов азота триазинового кольца. Атом фосфора, как следует из рис. 6, за счет положительного заряда вовлекается во взаимодействие с другими заряженными центрами в полости белка. Следует отметить, что множественные гидрофобные связи присутствуют только для **1в** соединения, что ожидаемо по сравнению с предыдущими выводами. При сравнении прочности связывания с активным сайтом белка РВР 5 фосфолан оксиды уступили цефазолину, но превзошли ингибитор ВО9. Таким образом, можно прогнозировать бактерицидную активность 3-алкилзамещенных 1*H*-фосфолан оксидов, что согласуется с экспериментальными данными.

### ВЫВОДЫ

1. Выявлена фунгицидная активность 3-гексил-1*H*-фосфолан оксида в отношении грибов рода *Septoria* sp., *Phytophthora* sp., *Puccinia* sp. и *Aspergillus* sp. Установлено, что минимальная ингибирующая концентрация для *Phytophthora* sp., *Puccinia* sp. и *Aspergillus* sp. составляет 400 мг/мл, для *Septoria* sp. – 200 мг/мл.

2. Установлено, что 3-гексил-1*H*-фосфолан оксид проявляет антибактериальную активность в отношении бактерии *Escherichia coli* с минимальной ингибирующей концентрацией 200 мг/мл.

3. Проведен молекулярный докинг *RR*- и *SS*-3-*R*-1*H*-фосфолан оксидов (*R* = бутил, гексил, октил) на мишенях СУР51В (цитохром Р450), АпСДА (хитиндеацетилаза), ТЕ (тиоэстераза), СRY (В-криптогейн), L-ThrDH (L-треонин-3-дегидрогеназа), РВР 5 (пенициллинсвязывающий белок), ОТС (орнитинтранскарбамилаза), СТР (цитидинтрифосфат-синтаза), АмрС (β-лактамаза) с учетом наиболее энергетически выгодной конформации. В результате молекулярного докинга с участием протеинов показано, что функциональная группа Р(О)Н 3-алкил-1*H*-фосфолан оксидов взаимодействует (кроме СRY) с активными сайтами исследованных белков.

4. Анализ параметров связывания и карта взаимодействий вещество–протеин показали значительное влияние стереохимии 3-алкил-1*H*-фосфолан оксидов на фунгицидную активность. Для каждого соединения из ряда изученных фосфолан оксидов предложен наиболее биологически активный стереоизомер.

5. Установлено, что алкильный заместитель в 1*H*-фосфолан оксидах играет значительную роль в связывании с рецепторами белков за счет гидрофобных взаимодействий, поэтому в качестве потенциального соединения, фунгицидная активность которого может быть сопоставима с пропиконазолом, предложен 3-октил-1*H*-фосфолан оксид.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Химическая защита растений / Под ред. Г.С. Груздева. М.: Агропромиздат, 1987. 415 с.
2. Дьяконов В.А., Махаматханова А.Л., Тюмкина Т.В., Джемилев У.М. Синтез и превращения металлациклов. Сообщ. 41. Реакция каталитического циклоалюминирования в синтезе 3-замещенных фосфоланов // Изв. АН. Сер. хим. 2012. № 8. С. 1540–1543.
3. D'yakonov V.A., Makhamatkhanova A.L., Agliullina R.A., Dilmukhametova L.K., Tyumkina T.V., Dzhemilev U.M. Aluminacyclopentanes in the synthesis of 3-substituted- and α, ω-bisphospholanes // Beilstein J. Org. Chem. 2016. V. 12. P. 406–412.
4. Nemoto T. Hamada Y. Pd-catalyzed asymmetric allylic substitution reactions using P-chirogenic diaminophosphine oxides: DIAPHOXs // Chem. Rec. 2007. V. 7. P. 150–158.
5. Finkbeiner P., Hehn J.P., Gnam C. Phosphine oxides from a medicinal chemist's perspective: Physicochemical and *in vitro* parameters relevant for drug discovery // J. Med. Chem. 2020. V. 63. P. 7081–7107.
6. Чекмарев В.В. Способ определения фунгицидной активности химических веществ препаратов: Пат. 2546285, РФ // Офиц. Бюл. «Изобретения. Полезные модели». 2015. № 10.
7. МУК 4.2.1890-04. 4.3. Диско-диффузионный метод (ДДМ). Определение чувствительности микроорганизмов к антибактериальным препаратам. М.: Роспотребнадзор, 2004. С. 18–21.
8. МУК 4.2.1890-04. 4.2. Методы серийных разведений. Определение чувствительности микроорганизмов к антибактериальным препаратам. М.: Роспотребнадзор, 2004. С. 10–18.
9. Wang X., Shen Y., Wang S., Li S., Zhang W., Liu X., Lai L., Pei J., Li H. PharmMapper 2017 update: A web server for potential drug target identification with a comprehensive target pharmacophore database // Nucleic Acids Res. 2017. V. 45. № W1. P. W356–W360.
10. Antypenko L., Meyer F., Sadyk Z., Shabelnyk K., Kovalenko S., Steffens K.G., Garbe L.-A. Combined application of tacrolimus with cyproconazole, hymexazol and novel {2-(3-*R*-1*H*-1,2,4-triazol-5-yl)phenyl} amines as antifungals: *In Vitro* growth inhibition and *In Silico* molecular docking analysis to fungal chitin deacetylase // J. Fungi. 2023. V. 9. № 1. P. 79.
11. Labib Mai M., Amin M.K., Alzohairy A.M., Elash-tokhy M.M.A., Samir O., Hassanein S.E. Inhibition analysis of aflatoxin by *in silico* targeting the thioesterase domain of polyketide synthase enzyme in *Aspergillus* ssp. // J. Biomol. Struct. Dyn. 2022. V. 40. № 10. P. 4328–4340.

12. Boissy G., O'Donohue M., Gaudemer O., Perez V., Pernollet J.-C., Brunie S. The 2.1 Å structure of an elicitor-ergosterol complex: A recent addition to the Sterol Carrier Protein family // *Protein Sci.* 1999. V. 8. № 6. P. 1191–1199.
13. Yoneda K., Nagano R., Mikami T., Sakuraba H., Fukui K., Araki T., Ohshima T. Catalytic properties and crystal structure of UDP-galactose 4-epimerase-like l-threonine 3-dehydrogenase from *Phytophthora infestans* // *Enzyme Microb. Technol.* 2020. V. 140. P. 109627.
14. Crowley P.J. Use as agrochemicals // *Comprehensive Heterocyclic Chemistry*. Oxford: Pergamon, 1984. P. 185–199.
15. Yotsuji A., Mitsuyama J., Hori R., Yasuda T., Saikawa I., Inoue M., Mitsuhashi S. Mechanism of action of cephalosporins and resistance caused by decreased affinity for penicillin-binding proteins in *Bacteroides fragilis* // *Antimicrob. Agents Chemother.* 1988. V. 32. № 12. P. 1848–1853.
16. Truesdell S.E., Zurenko G.E., Laborde A.L. Interaction of cephalosporins with penicillin-binding proteins of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* // *J. Antimicrob. Chemother.* 1989. V. 23. № suppl\_D. P. 13–19.
17. Morris G.M., Huey R., Lindstrom W., Sanner M.F., Belew R.K., Goodsell D.S., Olson A.J. AutoDock4 and AutoDockTools4: Automated docking with selective receptor flexibility // *J. Comput. Chem.* 2009. V. 30. № 16. P. 2785–2791.
18. BIOVIA, Dassault Systèmes, Discovery Studio Visualizer, v21.1.0.20298, San Diego: Dassault Systèmes. 2020.
19. Berman H.M., Westbrook J., Feng Z., Gilliland G., Bhat T.N., Weissig H., Shindyalov I.N., Bourne P.E. The Protein Data Bank // *Nucleic Acids Res.* 2000. V. 28. № 1. P. 235–242.
20. Braun O., Knipp M., Chesnov S., Vašák M. Specific reactions of *S*-nitrosothiols with cysteine hydrolases: A comparative study between dimethylargininase-1 and CTP synthetase // *Protein Sci.* 2007. V. 16. № 8. P. 1522–1534.
21. Tyumkina T.V., Islamov D.N., Parfenova L.V., Khalilov L.M., Dzhemilev U.M. Structure and conformations of 2-substituted and 3-substituted alumolanes in polar solvents: a direct NMR observation // *Magn. Reson. Chem.* 2016. V. 54. № 1. P. 62–74.

## Experimental and Theoretical Evaluation of Fungicidal and Bactericidal Activity of 3-Alkyl substituted 1*H*-phospholane Oxides

T. V. Tyumkina<sup>a, #</sup>, K. A. Bulatova<sup>b</sup>, D. N. Islamov<sup>a</sup>, A. L. Makhamatkhanova<sup>a</sup>,  
M. I. Mallyabaeva<sup>b</sup>, D. Sh. Sabirov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Institute of Petrochemistry and Catalysis, Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, prosp. Oktyabrya 141, Ufa 450075, Russia*

<sup>b</sup>*Ufa State Petroleum Technical University, ul. Kosmonavtov 1, Ufa 450062, Russia*

<sup>#</sup>*E-mail: ttvnmr@gmail.com*

The fungicidal and bacterial activity of the model compound 3-hexyl-1*H*-phospholane oxide was tested using fungi of the genus *Septoria* sp., *Phytophthora* sp., *Puccinia* sp., and *Aspergillus* sp., as well as *Escherichia coli* bacteria. A comprehensive analysis of the experimental data obtained and docking on selected targets of key proteins of each test object made it possible to evaluate the potential pesticidal activity of the phospholane oxide class.

**Keywords:** 1*H*-phospholane oxides, fungicidal activity, *Escherichia coli* bacterium, docking.

УДК 631.821.1:546.47:631.445.24

## ВЛИЯНИЕ ВОЗРАСТАЮЩИХ ДОЗ ОТХОДНОГО МЕЛА НА СОДЕРЖАНИЕ ЦИНКА В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ЛЕГКОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЕ И ЕГО НАКОПЛЕНИЕ РАСТЕНИЯМИ. ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТРАНСЛОКАЦИИ ЦИНКА В РАСТЕНИЯ СЕМЕЙСТВ ЗЛАКОВЫХ, БОБОВЫХ И КАПУСТНЫХ

© 2024 г. А. В. Литвинович<sup>1,2,\*</sup>, А. В. Лаврищев<sup>2</sup>, В. М. Буре<sup>1,3</sup>, А. О. Ковлева<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Агрофизический научно-исследовательский институт  
195220 С.-Петербург–Пушкин, Гражданский просп., 14, Россия<sup>2</sup>Санкт-Петербургский государственный аграрный университет  
196601 С.-Петербург–Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Россия<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет  
199034 С.-Петербург, Университетская наб., 7–9, Россия

\*E-mail: av.lavrishchev@yandex.ru

В условиях 5-летнего вегетационно-прецизионного опыта, заложенного на кислой дерново-подзолистой супесчаной почве, мелиорированной возрастающими (от 0.8 до 24 т/га) дозами конверсионного мела (КМ), изучено влияние известкования на величину почвенной кислотности ( $pH_{KCl}$ ), содержание в почве подвижных соединений цинка и его транслокацию в растения, относящиеся к семействам капустных, бобовых и злаковых. Показано, что при увеличении дозы применения мелиоранта содержание доступного для растений цинка в почве снижалось, а его переход в ткани растений замедлялся. Выявлены количественные параметры накопления цинка растениями ярового рапса спустя 1 год, 4 и 5 лет после известкования. Установлена связь между содержанием цинка в зерне и соломе ярового ячменя. В интервале доз мелиоранта от 0 до 2.0, рассчитанных по гидролитической кислотности ( $H_T$ ), зерно ячменя накапливало цинк в достаточном количестве для нормального функционирования ячменя. Содержание цинка в тканях вики, позволяющее нормально развиваться растениям, менялось в вариантах известкования от 0.2 до 1.7  $H_T$ . Разработаны эмпирические модели, адекватно описывающие взаимосвязь: а – дозы применения мела и величины  $pH_{KCl}$  почвы, достигнутой в результате известкования, б – величины  $pH_{KCl}$  почвы и содержания цинка в почве и растениях, в – содержания цинка в почве и его транслокации в виды растений различных биологических семейств, г – концентрации цинка в зерне и соломе растений.

*Ключевые слова:* возрастающие дозы отходного мела, содержание цинка, дерново-подзолистая легкосуглинистая почва, эмпирические модели, транслокация цинка в растения, семейства злаковых, бобовых и капустных.

DOI: 10.31857/S0002188124080101, EDN: CDOHYF

### ВВЕДЕНИЕ

Цинк – элемент безусловно необходимый для роста и развития растений. Он играет важную роль в азотном, углеродном и фосфатных обменах, способствуя синтезу нуклеиновых кислот и белка. При недостатке цинка в растениях накапливаются редуцирующие сахара, небелковые соединения азота, органические кислоты, уменьшается содержание сахарозы и крахмала, нарушается синтез белка. Дефицит цинка приводит также к нарушению

фосфорного обмена. При недостатке этого элемента в листьях подавляется скорость деления клеток мезофилла, что приводит к морфологическим изменениям листьев. На сегодняшний день известно  $\approx 300$  ферментов, содержащих цинк.

Содержание цинка в дерново-подзолистых почвах составляет  $\approx 35$  мг/кг, при варьировании концентрации от 20 до 67 мг/кг [1]. Растворимость и доступность цинка в почвах обнаруживает отрицательную корреляцию со степенью насыщенности кальцием. Известкование приводит к снижению

подвижности цинка в почвах. Минимальная растворимость цинка отмечена при рН 5.5–6.9 [2].

В лаборатории мелиорации почв АФИ (г. Санкт-Петербург) длительное время проводят исследования, направленные на установление влияния известкования на химический состав растений [3–12].

Настоящая работа посвящена установлению влияния возрастающих доз известкового мелиоранта на содержание подвижных соединений цинка в дерново-подзолистой супесчаной почве и его транслокацию в растения. Цель работы – разработать эмпирические модели процесса транслокации цинка в виды растений семейств злаковых, капустных и бобовых, выращенных на кислой дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорированной отходным мелом в широком интервале его доз.

В задачи исследования входило:

- в условиях 5-летнего вегетационно-прецизионного опыта установить динамику величины  $pH_{KCl}$  в процессе взаимодействия мела с почвой; разработать эмпирические зависимости, адекватно описывающие изменение величины  $pH_{KCl}$  в почве под действием возрастающих доз мелиоранта;

- определить концентрацию цинка в почве отдельных вариантов опыта; выявить связь между содержанием цинка в почве и величиной рН во всем промежутке эксперимента;

- получить количественные параметры накопления цинка в видах растений важнейших в сельскохозяйственном отношении семейств, определить взаимосвязь между величиной рН почвы и концентрацией цинка в тканях растений;

- провести замеры концентрации цинка в растениях ярового рапса на разных этапах проведения эксперимента;

- разработать эмпирические зависимости, описывающие связь между содержанием цинка в почве и его накоплением растениями;

- выявить связь между содержанием цинка в зерне и соломе ярового ячменя;

- оценить обеспеченность цинком растений, выращенных на мелиорированной почве при применении широкого интервала доз мелиоранта.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для достижения поставленной цели был заложен вегетационный прецизионный опыт. Одной из особенностей прецизионных экспериментов является значительное увеличение числа вариантов за счет отказа от повторностей при сокращении шага различий между вариантами [13, 14].

Применение методики прецизионного эксперимента в данном опыте позволило изучить возможно большее количество ситуаций, встречающихся в производственных условиях, а также построить эмпирические зависимости, адекватно описывающие: а – влияние возрастающих доз мелиоранта на величину  $pH_{KCl}$  дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, б – связь между величиной рН почвы и концентрацией доступных растениям соединений цинка в почве и его накоплением растениями.

Опыт включал в себя 24 варианта и охватывал интервал доз конверсионного мела (КМ) от 0.1 до 3.0  $H_r$  (0.8–24 т/га) (табл. 1).

Дозы КМ, соответствующие 2.0–3.0  $H_r$  (16–24 т/га), на практике не применяют, но такая концентрация может иметь место при известковании научно обоснованной дозой в отдельных очагах почвы из-за неравномерности рассеивания мелиоранта [15, 16].

Продолжительность эксперимента – 5 лет. Объектами изучения служили виды растений из важнейших в сельскохозяйственном отношении семейств: злаковых, бобовых и капустных. В год применения мела выращивали рапс *Brássica nápus*, на 2-й год – вику *Vicia L*, на 3-й год – ячмень *Hórdeum*, на 4- и 5-й годы – рапс *Brássica nápus*. Уборку вики и рапса проводили в фазе цветения, ячмень – в фазе полной спелости зерна.

Влажность почвы в период вегетации поддерживали на оптимальном для растений уровне (60% полной полевой влагоемкости). Удобрения вносили ежегодно из расчета 0.2 г д.в. NPK/кг массы почвы в виде азофоски. Масса почвы в сосуде – 5 кг.

В опыте использовали кислую дерново-подзолистую супесчаную почву, отобранную под естественным многолетним лугом, со следующими физико-химическими показателями:  $pH_{KCl}$  4.1 ед., гумус – 3.02%, гидролитическая кислотность – 5.4 ммоль(экв)/100 г, содержание частиц <0.01 мм – 18.6%.

В качестве известкового материала использовали конверсионный (отходный) мел с содержанием  $CaCO_3 = 90\%$ . Мел является побочным продуктом азотнокислой обработки фосфатного сырья при производстве комплексных минеральных удобрений. Содержание цинка в меле составляло 16, в азофоске – 31 мг/кг.

Содержание обменных форм цинка определяли, извлекая металл из почвы ацетатно-аммонийным буфером рН 4.8. Концентрацию цинка в растениях устанавливали после сухого озоления в муфеле при температуре 550°C. Определение содержания цинка в почве проводили на атомно-абсорбционном

**Таблица 1.** Влияние возрастающих доз КМ на величину рН почвы и содержание доступных для растений соединений цинка

Вариант	Доза КМ, т/га	1-й год (Рапс)*	2-й год (Вика)		3-й год (Ячмень)		4-й год (Рапс)		5-й год (Рапс)	
		рН <sub>KCl</sub>	Zn в почве	рН <sub>KCl</sub>	Zn в почве	рН <sub>KCl</sub>	Zn в почве	рН <sub>KCl</sub>	Zn в почве	рН <sub>KCl</sub>
1. Контроль	0.0	4.0	7.6	4.2	11.2	4.1	7.0	4.0	8.4	4.0
2. КМ по 0.1 H <sub>г</sub>	0.8	4.2	7.6	4.3	10.6	4.1	6.0	4.0	6.7	4.0
3. КМ по 0.2 H <sub>г</sub>	1.6	4.1	6.7	4.4	7.4	4.3	5.4	4.0	5.7	4.1
4. КМ по 0.3 H <sub>г</sub>	2.4	4.5	2.9	4.6	4.4	4.2	4.0	4.1	4.0	4.1
5. КМ по 0.4 H <sub>г</sub>	3.2	4.6	5.5	4.6	5.1	4.4	4	4.2	5	4.2
6. КМ по 0.5 H <sub>г</sub>	4.0	4.8	4.5	4.8	4	4.5	3.1	4.3	4	4.3
7. КМ по 0.6 H <sub>г</sub>	4.8	5.0	2.5	4.9	3.2	4.4	2.4	4.4	3.1	4.3
8. КМ по 0.7 H <sub>г</sub>	5.6	5.2	2.7	4.9	3.5	4.6	2.4	4.5	3.0	4.4
9. КМ по 0.8 H <sub>г</sub>	6.4	5.4	2	5.0	3	4.7	2.7	4.7	2.1	4.5
10. КМ по 0.9 H <sub>г</sub>	7.2	5.6	2.6	5.2	3.0	4.8	2.0	4.7	2.4	4.5
11. КМ по 1.0 H <sub>г</sub>	8.0	5.7	1.8	5.4	2.4	5.1	2.1	4.7	2.9	4.5
12. КМ по 1.1 H <sub>г</sub>	8.8	5.6	2.1	5.3	1.9	5.2	2.2	5.1	2.9	4.7
13. КМ по 1.2 H <sub>г</sub>	9.6	5.9	2.2	5.5	2.3	5.2	1.5	5.1	2	4.7
14. КМ по 1.3 H <sub>г</sub>	10.4	5.8	1.9	5.5	1.2	5.3	1.1	5.3	1.8	5.0
15. КМ по 1.4 H <sub>г</sub>	11.2	6.2	1.7	5.6	1.9	5.4	2.6	5.4	1.4	5.0
16. КМ по 1.5 H <sub>г</sub>	12.0	6.2	0.5	5.7	2.2	5.6	1.1	5.6	1.6	5.1
17. КМ по 1.6 H <sub>г</sub>	12.8	6.3	0.9	5.7	1.0	5.7	1.0	5.7	1.4	5.4
18. КМ по 1.7 H <sub>г</sub>	13.6	6.2	0.9	5.7	0.9	5.7	0.9	5.7	1.5	5.3
19. КМ по 1.8 H <sub>г</sub>	14.4	6.3	0.7	5.9	2.5	5.8	0.9	5.7	1.9	5.3
20. КМ по 1.9 H <sub>г</sub>	15.2	6.6	0.4	6.4	1.2	5.9	0.6	5.7	1.2	5.4
21. КМ по 2.0 H <sub>г</sub>	16.0	6.8	0.9	6.3	1.2	6.2	0.4	6.2	1.4	5.6
22. КМ по 2.2 H <sub>г</sub>	17.6	6.5	0.5	6.7	1.8	6.5	0.6	6.4	0.7	5.9
23. КМ по 2.5 H <sub>г</sub>	20.0	6.7	0.8	7.1	0.9	7.0	0.3	6.7	1.3	6.3
24. КМ по 3.0 H <sub>г</sub>	24.0	6.9	2.6	7.1	1.7	7.3	1.1	7.1	1.8	6.9

Примечание. Содержание Zn в почве после уборки рапса в год известкования не определяли.

спектрофотометре. Построение эмпирических зависимостей осуществляли согласно [17].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Почва, выбранная для исследования, характеризовалась сильнокислой реакцией (рН<sub>KCl</sub> 4.1 ед.). За 5 лет эксперимента в контрольном варианте без известкования изменения величины рН не установлено (табл. 1).

Во всех произвесткованных вариантах опыта мелиоративный эффект от использования КМ был достигнут уже в год применения. Скорость растворения КМ и эмпирические модели процесса растворения мелиоранта за 5 лет изучения представлена в работах [18, 19].

Максимальный рост величины рН в год известкования зафиксирован в варианте с использованием мела в дозе, соответствующей 3 H<sub>г</sub> (6.9 ед. рН). На третий год последствий дозы, соответствующие 0.2–0.3 H<sub>г</sub>, исчерпали свое влияние на показатель рН. Во всех других вариантах величина рН<sub>KCl</sub> была больше, чем в контроле. На 4-й год последствий до варианта с применением мела в дозе 1 H<sub>г</sub> величина рН<sub>KCl</sub> оставалась в интервале, соответствующем сильнокислой реакции почвы. В остальных вариантах рН<sub>KCl</sub> был выше. Таким образом, условия произрастания растений в различных вариантах опыта в годы изучения складывались по-разному.

Эмпирические зависимости, адекватно описывающие изменение величины рН под действием возрастающих доз мелиоранта во всем промежутке времени изучения, приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Эмпирические зависимости, описывающие изменение  $pH_{KCl}$  от дозы применения КМ

Год исследования	Эмпирическая зависимость	Изменение показателя $pH_{KCl}$ при увеличении дозы мелиоранта на 1 ед.	$p$ -value	$R^2$
1-й	$y_1 = 4.3 + 0.000135 \cdot x$	$v_1 = 0.000135$	$6.1 \times 10^{-12}$	0.91
2-й	$y_2 = 4.2 + 0.000129 \cdot x$	$v_2 = 0.000129$	$3.19 \times 10^{-18}$	0.97
3-й	$y_3 = 3.9 + 0.00014 \cdot x$	$v_3 = 0.00014$	$5.5 \times 10^{-19}$	0.98
4-й	$y_4 = 3.79 + 0.00014 \cdot x$	$v_4 = 0.00014$	$1.5 \times 10^{-19}$	0.98
5-й	$y_5 = 3.779 + 0.000118 \cdot x$	$v_5 = 0.000118$	$8.7 \times 10^{-17}$	0.97

\*  $R^2$  – коэффициент детерминации. То же в табл. 3.

**Таблица 3.** Эмпирические зависимости, описывающие изменение содержания Zn в почве от величины  $pH_{KCl}$ 

Год исследования	Эмпирическая зависимость	$p$ -value	$R^2$
2-й	$\ln(y_6) = 5.03 - 0.81 \cdot x^*$	9.48E – 06	0.597
3-й	$\ln(y_7) = 4.22 - 0.63 \cdot x$	4.2E – 06	0.625
4-й	$\ln(y_8) = 4.8 - 0.83 \cdot x$	6.76E – 09	0.789
5-й	$\ln(y_9) = 3.95 - 0.63 \cdot x$	4.89E – 06	0.620

\*  $x$  – величина  $pH_{KCl}$ . То же в табл. 5.

Все зависимости (1–5) имеют очень высокий уровень статистической значимости по  $F$ -критерию. Величины коэффициента детерминации близки к единице. Это свидетельствовало о наличии очень сильной линейной связи между величиной  $pH_{KCl}$  и дозой мела. Все зависимости очень похожи друг на друга. Соответствующие коэффициенты в формулах близки по величине.

Данные содержания цинка в почве после уборки растений вики приведены в табл. 1. Показано, что известкование способствовало снижению подвижности цинка в почве. Несмотря на некоторую (и неизбежную) вариабельность данных, можно говорить, что уменьшение содержания цинка в известкованных вариантах наблюдали до дозы применения мела  $1.9 H_r$ . Эмпирическая модель зависимости содержания цинка в почве от величины  $pH_{KCl}$  после уборки вики приведена в табл. 3. Модель статистически значима на очень высоком уровне значимости.

В дальнейшем, по мере проведения эксперимента, известкование продолжало оказывать влияние на содержание доступного для растений цинка. Чем больше была доза применения КМ, тем концентрация цинка в почве была меньше.

Максимальным уровнем накопления цинка в год применения мелиоранта характеризовались растения рапса контрольного варианта (36.0 мг/кг воздушно-сухой массы растений) (табл. 4).

Снижение содержания цинка в тканях рапса под действием известкования наблюдали до дозы

применения, соответствующей  $1.1 H_r$  (7.5 мг/кг). Далее изменения его содержания были незначительными и укладывались в диапазон 6.75–8.75 мг/кг.

Эмпирическая модель зависимости содержания цинка в рапсе от величины  $pH_{KCl}$  почвы в год известкования приведена в табл. 5. Модель статистически значима на очень высоком уровне значимости.

Одной из задач настоящего опыта являлось выявление различий содержания цинка в рапсе в год применения мела, а также на 3-й и 4-й годы последействия (табл. 4). Содержание цинка в контрольном варианте спустя 4 года после известкования увеличилось до 164 мг/кг. Рост содержания цинка в рапсе наблюдали до варианта, произвесткованного дозой КМ  $0.7 H_r$  (253 мг/кг). Далее, по мере увеличения дозы мелиоранта, концентрация цинка в растениях снижалась. Минимальная концентрация цинка была выявлена в варианте, произвесткованном КМ в дозе  $2.0 H_r$ .

Эмпирическая модель, описывающая зависимость содержания цинка в рапсе от  $pH$  почвы на 4-й год проведения опыта, представлена в табл. 5. Модель статистически значима на очень высоком уровне значимости.

Закономерности, выявленные при анализе данных содержания цинка в тканях рапса, выращенного спустя 5 лет после мелиорации, целиком подтвердили картину 4-го года опыта. Рост содержания цинка наблюдали до варианта  $0.7 H_r$  (300 мг/кг).

**Таблица 4.** Изменение содержания Zn в растениях в зависимости от дозы применения мела, мг/кг

Вариант	Доза КМ, т/га	1-й год (Рапс)	2-й год (Вика)	3-й год (Ячмень солома)	3-й год (Ячмень зерно)	4-й год (Рапс)	5-й год (Рапс)
1. Контроль	0.0	36	253	52	61	164	184
2. КМ по 0.1 $H_r$	0.8	23	166	39	67	158	203
3. КМ по 0.2 $H_r$	1.6	22.5	127	65	76	167	375
4. КМ по 0.3 $H_r$	2.4	26	63	32	61	114	212
5. КМ по 0.4 $H_r$	3.2	20	110	54	77	136	124
6. КМ по 0.5 $H_r$	4.0	25	61	48	73	146	138
7. КМ по 0.6 $H_r$	4.8	13	54	30	64	193	209
8. КМ по 0.7 $H_r$	5.6	12	55	36	69	253	300
9. КМ по 0.8 $H_r$	6.4	10	57	30	57	193	145
10. КМ по 0.9 $H_r$	7.2	10	49	26	51	165	223
11. КМ по 1.0 $H_r$	8.0	10	38	28	66	99	198
12. КМ по 1.1 $H_r$	8.8	7.5	42	38	69	80	205
13. КМ по 1.2 $H_r$	9.6	10	40	24	58	28	117
14. КМ по 1.3 $H_r$	10.4	8.75	40	26	55	77	69
15. КМ по 1.4 $H_r$	11.2	8.75	61	20	62	31	67
16. КМ по 1.5 $H_r$	12.0	6.75	30	25	47	25	150
17. КМ по 1.6 $H_r$	12.8	8	30	21	38	25	63
18. КМ по 1.7 $H_r$	13.6	7	39	18	50	28	88
19. КМ по 1.8 $H_r$	14.4	8.8	18	11	36	23	66
20. КМ по 1.9 $H_r$	15.2	7.5	21	9	25	24	44
21. КМ по 2.0 $H_r$	16.0	7.5	17	18	46	28	32
22. КМ по 2.2 $H_r$	17.6	7.5	18	12	28	25	27
23. КМ по 2.5 $H_r$	20.0	7	12	10	19	24	25
24. КМ по 3.0 $H_r$	24.0	7.5	18	10	29	32	39

**Таблица 5.** Эмпирические зависимости, описывающие связь между величиной  $pH_{KCl}$  в почве и транслокацией цинка в виды растений различных биологических семейств

Год исследования (культура)	Эмпирическая зависимость	$p$ -value	$R^2$
1-й (рапс)	$\ln(y_{10}) = 5.36 - 0.52 \cdot x$	1.17E - 10	0.850
2-й (вика)	$\ln(y_{11}) = 8.37 - 0.84 \cdot x$	1.48E - 10	0.850
3-й (ячмень, солома)	$\ln(y_{12}) = 6.1 - 0.55 \cdot x$	1.42E - 08	0.775
3-й (ячмень, зерно)	$\ln(y_{13}) = 5.8 - 0.36 \cdot x$	1.17E - 07	0.728
4-й (рапс)	$\ln(y_{14}) = 8.48 - 0.84 \cdot x$	2.24E - 07	0.710
5-й (рапс)	$\ln(y_{15}) = 9.05 - 0.896 \cdot x$	3.96E - 08	0.753

Далее содержание цинка в рапсе постепенно снижалось, и в варианте, мелиорированном мелом в дозе 2.5  $H_r$ , составило 27 мг/кг. Эмпирическая зависимость содержания цинка в рапсе на 5-й год после известкования от  $pH_{KCl}$  в почве приведена в табл. 5.

Показали, насколько по-разному происходило накопление цинка растениями ярового рапса в год известкования и спустя 4 и 5 лет после мелиорации (рис. 1). Это указывало на важную роль химического состава почвы на формирование элементного состава рапса и его экологическую пластичность.

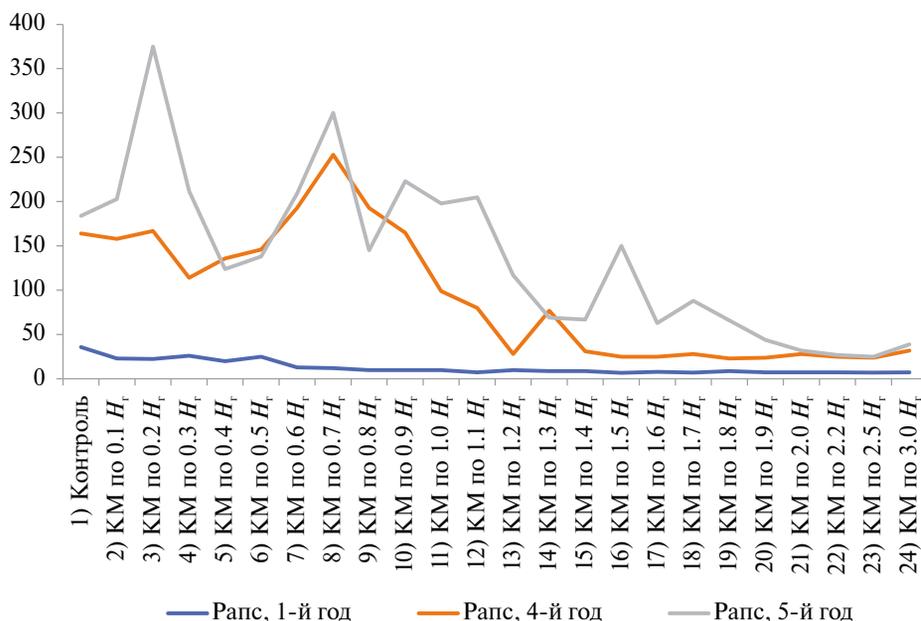


Рис. 1. Содержание цинка в растениях ярового рапса на разных этапах проведения опыта.

Растения семейства бобовых характеризовались высоким размахом изменений содержания цинка в биомассе (табл. 4). По мере увеличения дозы известкового материала концентрация цинка в вике снижалась. В контрольном варианте опыта содержание цинка составило 253 мг/кг воздушно-сухой массы растения. Минимальным содержанием характеризовался вариант, мелиорированный дозой мела  $2.5 H_r$  (12 мг/кг воздушно-сухой массы растений). Эмпирическая модель транслокации цинка в растения вики в зависимости от рН почвы приведена в табл. 5. Модель статистически значима на очень высоком уровне значимости.

В работе [20] приведены данные, характеризующие содержание цинка в листьях двудольных растений: дефицит – 10–20, оптимум – 21–150 и избыток – 151–400 мг/кг. Они свидетельствовали, что в интервале доз КМ от 0.2 до  $1.7 H_r$  концентрация цинка в растениях вики укладывалась в диапазон содержания, позволяющего нормально развиваться растениям.

В соломе ячменя размах изменений содержания цинка укладывался в диапазон от 65 до 9 мг/кг воздушно-сухой массы растений. Эмпирическая модель, описывающая зависимость накопления цинка в соломе ячменя от величины рН почвы в известкованных вариантах, приведена в табл. 5. Модель статистически значима на высоком уровне значимости.

Во всех вариантах зерно растений накапливало цинк в количестве большем, чем в соломе (табл. 4). Его содержание менялось от 76–77 в вариантах опыта, мелиорированных дозами мела  $0.2–0.4 H_r$ , до 19 мг/кг

в варианте, мелиорированном дозой мела  $2.5 H_r$ . Выявлена значимая положительная связь между содержанием цинка в соломе и зерне ячменя ( $r = 0.85$ ).

По данным [20], дефицит, оптимум и избыток содержания цинка для растений семейства злаковых составляет соответственно 20–24, 25–250 и 251–400 мг/кг сухого вещества. Следовательно, до дозы применения мела, соответствующей  $2.0 H_r$ , зерно ячменя накапливало цинк в количестве, нормальном для функционирования растений. Эмпирическая модель, описывающая транслокацию цинка в зерно ячменя, приведена в табл. 5.

Одной из задач настоящего исследования являлась разработка модели зависимости содержания цинка в зерне растений от содержания цинка в соломе при разных величинах рН почвы. График зависимости приведен на рис. 2.

Эмпирическая модель для  $y_{13}$ ,  $y_{12}$  – цинк (зерно, ячмень):

$$y_{13} = 26.5 + 0.95 \times y_{12}, \quad (1.6)$$

где  $y_{12}$  – содержание Zn в соломе (ячмень).

Для модели (1.6)  $p = 1.36 \text{E} - 07$  ( $p$ -value по  $F$ -критерию), коэффициент детерминации  $R^2 = 0.724$ . Модель (1.6) статистически значима на очень высоком уровне. График модели (1.6) представлен на рис. 2

Модель (1.6) зависимости содержания Zn в зерне ячменя от содержания Zn в соломе имеет очень высокую статистическую значимость. Модель носит линейный характер, несомненно, имеется очень сильная связь между содержанием цинка в зерне и соломе ячменя.

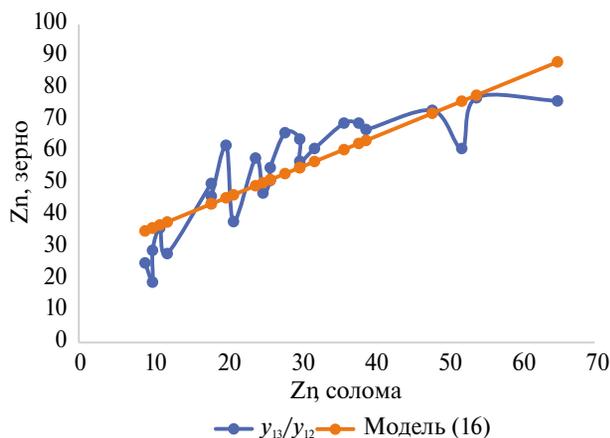


Рис. 2. Зависимость содержания цинка в зерне ячменя от содержания цинка в соломе при увеличении показателя рН почвы.

В целом, применение КМ для известкования кислой дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы приводит к нейтрализации почвенной кислотности. Чем больше доза применения КМ, тем мелиоративный эффект выше. Изменение величины  $pH_{KCl}$  приводит к осаждению подвижных соединений цинка в почве и снижает его накопление в растениях.

## ВЫВОДЫ

1. Мелиоративный эффект при использовании конверсионного мела был достигнут в год его применения. На 3-й год последствия дозы, соответствующие  $0.2-0.3 H_T$ , исчерпали свое действие. На 4-й год после действия до варианта с применением КМ в дозе  $1 H_T$  величина  $pH_{KCl}$  соответствовала сильно-кислой реакции почв. В остальных вариантах  $pH_{KCl}$  был выше.

2. Известкование привело к снижению подвижности цинка в почве. Уменьшение содержания цинка в почве известкованных вариантов после уборки вики наблюдали до дозы применения мела  $1.9 H_T$ . По мере проведения эксперимента известкование продолжало оказывать влияние на концентрацию доступного для растений цинка в почве. Чем больше была доза применения КМ, тем концентрация цинка была меньше.

3. Максимальным уровнем накопления цинка в год известкования характеризовались растения рапса контрольного варианта ( $36.0 \text{ мг/кг}$ ). Снижение содержания цинка в тканях рапса наблюдали до дозы применения, соответствующей  $1.1 H_T$  ( $7.5 \text{ мг/кг}$ ). Рост концентрации цинка в рапсе спустя 4 года после известкования установили до варианта, произвесткованного дозой мела  $0.7 H_T$  ( $253 \text{ мг/кг}$ ). По мере увеличения дозы применения мела концентрация цинка в рапсе снижалась. Закономерности, выявленные при анализе данных концентрации цинка в тканях рапса,

выращенного спустя 5 лет после мелиорации, целиком подтвердили закономерность 4-го года опыта. Рост содержания цинка наблюдали до варианта  $0.7 H_T$  ( $300 \text{ мг/кг}$ ).

4. В контрольном варианте опыта содержание цинка в растениях вики составило  $245 \text{ мг/кг}$ . Минимальным содержанием характеризовался вариант, мелиорированный дозой мела  $2.5 H_T$  ( $12 \text{ мг/кг}$ ).

5. В соломе ячменя размах изменений содержания цинка укладывался в диапазон от  $65$  до  $9 \text{ мг/кг}$ . Во всех вариантах зерно растений накапливало цинк в количестве большем, чем в соломе, что составило от  $19$  до  $77 \text{ мг/кг}$ . Выявлена высокая положительная связь между содержанием цинка в соломе и зерне растений ( $r = 0.85$ ).

6. Диапазон содержания цинка в тканях вики, позволяющий нормально развиваться растениям, достигался в интервале доз мелиоранта от  $0.2$  до  $1.7 H_T$ , в растениях ячменя — от  $0$  до  $2.0 H_T$ .

7. Разработаны эмпирические модели, адекватно описывающие взаимосвязь: а — дозы применения мела и величины  $pH_{KCl}$  почвы, достигнутой в результате известкования, б — величины  $pH_{KCl}$  почвы и содержания цинка в почве и растениях, в — содержания цинка в почве и его перехода в виды растений из различных биологических семейств; г — содержания цинка в зерне и соломе растений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шейджен А.Х. Биогеохимия. Майкоп, 2003. 1027 с.
2. Возбуцкая А.Е. Химия почвы. М.: Высш. шк., 1968. 427 с.
3. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Фтор в системе почва—растения при применении в сельском хозяйстве средств химизации и загрязнении объектов природной среды техногенными выбросами // Агрохимия. 2002. № 2. С. 66–76.
4. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В. О накоплении фтора различными сельскохозяйственными культурами при известковании дерново-подзолистой почвы конверсионным мелом // Агрохимия. 2001. № 2. С. 74–78.
5. Дричко В.Ф., Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Накопление стронция и кальция растениями при внесении в почву возрастающих доз конверсионного мела // Агрохимия. 2002. № 4. С. 81–87.
6. Литвинович А.В., Ковлева А.О., Павлова О.Ю. Влияние известкования на накопление марганца и железа растениями яровой пшеницы // Агрохимия. 2015. № 5. С. 61–68.
7. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Волкова Е.Н. Влияние различных видов фосфорных удобрений и фосфатного шлама на химический состав зеленой массы ярового рапса на кислой дерново-подзолистой почве // Агрохимия. 2006. № 3. С. 34–39.

8. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю., Ковлева А.О. Последствия применения конверсионного мела для мелиорации кислых почв: стронций в системе дерново-подзолистая почва–растение // Почвоведение. 2013. № 9. С. 1138.
9. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Алексеев Ю.В., Оглуздин А.С. Химический состав ярового рапса, выращенного на кислых дерново-подзолистых почвах, произвесткованных промышленными отходами // Агрохимия. 2008. № 7. С. 50–55.
10. Литвинович А.В., Осипов А.И., Павлова О.Ю. Влияние техногенного загрязнения на химический состав растений хлопчатника // Агрохимия. 1998. № 1. С. 71–77.
11. Литвинович А.В., Хомяков Ю.В., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю., Ковлева А.О. Микроэлементный состав растений ярового рапса на разных этапах растворения конверсионного мела // Агрохимия. 2014. № 5. С. 64–71.
12. Литвинович А.В., Ковлева А.О., Хомяков Ю.В., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю. Возможность загрязнения кадмием яровых зерновых культур при мелиорации кислых почв // Агрохимия. 2014. № 4. С. 80–87.
13. Langkilde N. Practical experiences with precision agriculture // Precision agriculture'99, IAMFE/RUSSIA, 12–15 December, All-Russian research institute of chemical melioration of soils, St. Petersburg/Pushkin, Russia. 1999. P. 35–46.
14. Lauk E., Lauk R., Lauk Y. Experimental planning and methods in regression analysis // Pros. of the 12th Intern. conf. on mechanization of field experiments. IAMFE/RUSSIA 5–9 July, St. Petersburg State Agrarian University, St. Petersburg/Pushkin, Russia, 2004. P. 58–64.
15. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Дричко В.Ф. Пространственная неоднородность кислотности почв // Агрохим. вестн. 2006. № 6. С. 10–12.
16. Литвинович А.В. Пространственная неоднородность агрохимических показателей пахотных дерново-подзолистых почв // Агрохимия. 2007. № 5. С. 89–94.
17. Буре В.М. Методология статистического анализа опытных данных. СПб., 2007. 141 с.
18. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Изменение величины почвенной кислотности в процессе взаимодействия мелиорантов с почвами (по данным лабораторных и вегетационного опытов) // Агрохимия. 2010. № 10. С. 3–10.
19. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М., Салаев И.В. Скорость растворения в почвах мелиорантов карбонатной природы (эмпирические модели динамики растворения) // Агрохимия. 2016. № 12. С. 42–50.

## Effect of Increasing Doses of Waste Chalk on the Zinc Content in Sod-Podzolic Light Loamy Soil and Its Accumulation by Plants. Empirical Models of Zinc Translocation into Plants of the Cereal, Legume and Cabbage Families

A. V. Litvinovich<sup>a, b, #</sup>, A. V. Lavrishchev<sup>b</sup>, V. M. Bure<sup>a, c</sup>, A. O. Kovleva<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>Agrophysical Research Institute,  
Grazhdanskiy prosp. 14, St. Petersburg–Pushkin 195220, Russia

<sup>b</sup>St. Petersburg State Agrarian University,  
Peterburgskoe shosse 2, St. Petersburg–Pushkin 196601, Russia

<sup>c</sup>St. Petersburg State University, Universitetskaya nab. 7–9, St. Petersburg 199034, Russia,

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

Under the conditions of a 5-year vegetation-precision experiment based on acidic sod-podzolic sandy loam soil reclaimed with increasing (from 0.8 to 24 t/ha) doses of conversion chalk (CC), the effect of liming on the value of soil acidity (pH<sub>KCl</sub>), the content of mobile zinc compounds in the soil and its translocation into plants was studied, related to the cabbage, legume and cereal families. It was shown that with an increase in the dose of meliorant, the content of zinc available to plants in the soil decreased, and its transition to plant tissues slowed down. Quantitative parameters of zinc accumulation by spring rape plants were revealed 1 year, 4 and 5 years after liming. A relationship has been established between the zinc content in grain and straw of spring barley. In the range of meliorant doses from 0 to 2.0, calculated by hydrolytic acidity ( $H_a$ ), barley grain accumulated zinc in sufficient quantities for the normal functioning of barley. The zinc content in vetch tissues, which allows plants to develop normally, varied in liming options from 0.2 to 1.7  $H_a$ . Empirical models have been developed that adequately describe the relationship between: a – the dose of chalk application and the pH value of the soil achieved as a result of liming, b – the pH value of the soil and the zinc content in soil and plants, c – the zinc content in soil and its translocation into plant species of various biological families, d – zinc concentrations in grain and straw of plants.

**Keywords:** increasing doses of waste chalk, zinc content, sod-podzolic light loamy soil, empirical models, translocation of zinc into plants, families of cereals, legumes and cabbage.

УДК 631.81.095.337:631.811.98:631.81:633.11“324”:633.16“321”

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ И РЕГУЛЯТОРОВ РОСТА РАСТЕНИЙ В СОЧЕТАНИИ С МИНЕРАЛЬНЫМИ УДОБРЕНИЯМИ ПРИ ВОЗДЕЛЫВАНИИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ И ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ НА ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ

© 2024 г. Е. Н. Старостина<sup>1,\*</sup>, Г. А. Ивашенков<sup>1</sup><sup>1</sup>Всероссийский научно-исследовательский институт им. Д. Н. Прянишникова  
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

\*E-mail: Starostinael@list.ru

В длительном полевом опыте (61 год) на окультуренной дерново-подзолистой суглинистой почве Центрального Нечерноземья выявлена высокая эффективность совместного применения комплексов микроэлементов, регуляторов роста и минеральных удобрений. В данном варианте формировалась наибольшая средняя за 2017–2023 гг. урожайность озимой пшеницы сорта Московская 56–80 ц/га и ярового ячменя сорта Владимир – 60 ц/га при 40.1 и 33.8 ц/га соответственно в варианте без удобрений. Применение комплексов микроэлементов Микроэл в 2017–2019 гг. и Аквамикс-СТ в 2020–2023 гг. обеспечило повышение средней урожайности озимой пшеницы по сравнению с фоном минеральных удобрений на 12, ярового ячменя – на 8%. При внесении микроэлементов в сочетании с регуляторами роста растений (Мелафен в 2017–2019 гг. и Зеребра-агро в 2020–2023 гг.) прибавка урожайности составила: озимой пшеницы – 23, ярового ячменя – 18%, окупаемость минеральных удобрений при этом увеличилась на 56–57%, а коэффициент использования азота, фосфора и калия растениями – в 1.5–1.7 раза. Совместное применение микроудобрений, регуляторов роста растений и минеральных удобрений повысило по сравнению с контролем содержание в зерне озимой пшеницы белка на 2.7%, сырой клейковины – на 7.7%, белка в зерне ячменя – на 2.1%.

*Ключевые слова:* озимая пшеница, яровой ячмень, микроэлементы, регуляторы роста, урожайность, качество зерна, баланс элементов питания.

DOI: 10.31857/S0002188124080113, EDN: CDLQTL

### ВВЕДЕНИЕ

Озимая пшеница и яровой ячмень являются основными зерновыми культурами в зоне Центрального Нечерноземья. Высокие показатели урожайности и качества этих культур обеспечиваются на окультуренных дерново-подзолистых почвах при комплексном применении средств химизации [1–4].

Появление новых высокопродуктивных сортов озимой пшеницы и ярового ячменя и использование интенсивных технологий усиливают потребности в микроэлементах (цинке, меди, кобальте, молибдене, селене и др.), тем более что почвы зоны Нечерноземья в основном слабо обеспечены этими элементами питания растений, поэтому необходимо применять комплексы удобрений, содержащие несколько микроэлементов [5, 6].

Для эффективного использования минеральных удобрений и других средств в посевах зерновых культур важное значение имеют также и регуляторы роста растений. При определенных условиях они

способствуют уменьшению стрессовых воздействий неблагоприятных факторов среды разной природы, повышают урожайность и качество продукции [7–10]. Действие регуляторов роста на растения во многом зависит от почвенно-климатических условий, обеспеченности элементами питания, биологических особенностей культур [10].

Эффективность применения комплексов микроэлементов и регуляторов роста при возделывании озимой пшеницы и ярового ячменя интенсивных сортов на дерново-подзолистых тяжелосуглинистых почвах в условиях длительного полевого опыта изучена недостаточно.

Цель работы – изучение в длительном полевом опыте на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве эффективности комплекса микроэлементов и регуляторов роста растений в сочетании с минеральными удобрениями при возделывании озимой пшеницы сорта Московская 56 и ярового ячменя сорта Владимир.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в длительном полевом опыте СШ-2, заложенном в 1962 г. на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве Центральной опытной станции ВНИИА (Московская обл., Домодедовский р-н, с. Шебанцево).

Исходная почва имела низкие агрохимические показатели:  $pH_{KCl}$  4.3–4.5 ед., содержание гумуса (по Тюрину) – 1.58%, подвижных форм  $P_2O_5$  и  $K_2O$  (по Кирсанову) – соответственно 21 и 133 мг/кг.

Для повышения окультуренности почвы периодически во всех вариантах опыта проводили известкование по 1.0  $H_t$ , систематически вносили минеральные удобрения в виде  $N_{aa}$  ( $N = 34\%$ ),  $P_{сд}$  (в последних ротациях – в форме АФ ( $N = 12\%$ ,  $P_2O_5 = 52\%$ ) хлористого калия ( $K_2O = 60\%$ )).

Начиная с 1985 г. был выделен вариант контроля без внесения удобрений, в котором величина  $pH_{KCl}$  в 2019 г., как и во всех вариантах, составляла 5.5 ед.  $pH$  при содержании подвижных форм фосфора и калия  $\approx 90$ –101 мг/кг, а с применением удобрений (в вариантах НРК) – 170–180 мг/кг при содержании гумуса 1.64–1.80%.

Севооборот во все периоды включал зерновые культуры и клевер 2-х лет пользования. В последнее время (в 10- и 11-й ротациях) применяли зерновой севооборот: горох на зеленое удобрение – озимая пшеница – ячмень. В годы исследования (2017–2023 гг.) использовали сорта озимой пшеницы Московская 56 и ярового ячменя Владимир. Азотные удобрения под озимую пшеницу применяли дробно:  $N_{30}$  – осенью под культивацию,  $N_{30}$  – весной в начале кущения,  $N_{60}$  – в фазе трубкования. Комплексные микроудобрения применяли в виде препаратов Микроэл в 2017–2019 гг. и Аквамикс-СТ в 2020–2023 гг. в нормах 0.2 л/га и 1.2 кг/га соответственно. Микроэл – жидкое микроудобрение с содержанием элементов питания:  $Mg - 1.32$ ,  $S - 5.7$ ,  $Fe - 0.3$ ,  $B - 0.15$ ,  $Mo - 0.2$ ,  $Mn - 0.31$ ,  $Cu - 0.6$ ,  $Zn - 1.3$ ,  $Co - 0.08\%$ . Препарат Аквамикс-СТ – микроудобрение в хелатной форме, содержит:  $Fe - 1.74$ ,  $Mn - 2.57$ ,  $Zn - 0.53$ ,  $Cu - 0.53$ ,  $Ca - 2.57$ ,  $B - 0.52$ ,  $Mo - 0.13\%$ .

Регуляторы роста использовали в 2017–2019 гг. в виде препаратов Мивал-агро (15 кг/га), Мелафен (0.1 л/га), в 2020–2023 гг. – Зеребро-агро (0.15 л/га). Микроэлементы и регуляторы роста вносили тракторным опрыскивателем ОП-600 в фазе начала выхода в трубку при норме расхода воды 150 л/га.

Средства защиты растений (гербициды, фунгициды и ретарданты) нового поколения применяли общим фоном в фазе кущения культур. Площадь посевных делянок 90 м<sup>2</sup>, повторность опыта четырехкратная. Анализы почвы и растений проведены согласно ГОСТам.

Агротехника выращивания культур – принятая в Московской обл. Уборку урожая проводили поделочно комбайном “САМПО” с площади 24 м<sup>2</sup>.

При статистической обработке результатов исследования использовали дисперсионный анализ.

Погодные условия в период вегетации растений озимой пшеницы и ярового ячменя отличались по годам. Неблагоприятные условия выдались в 2019 и 2021 гг., когда в некоторые декады июня и июля отмечался резкий недостаток влаги при высокой (до 30–33°C) температуре воздуха. В 2022 и 2023 г. сложились благоприятные условия для роста и развития растений озимой пшеницы и ярового ячменя с достаточным количеством осадков и без резких изменений температуры воздуха, что положительно сказалось на урожайности.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Урожайность озимой пшеницы и ярового ячменя в годы исследования зависела от погодных условий вегетационного периода, систематического внесения минеральных удобрений, а также от использования комплекса микроэлементов и регуляторов роста растений (табл. 1).

В засушливые 2019 и 2021 г. урожайность озимой пшеницы во всех вариантах опыта были в 2 раза меньше, чем в благоприятные 2022 и 2023 г., ярового ячменя – в 1.7–1.8 раза. Урожайность находилась в прямой зависимости от ее структуры. Если в засушливые годы масса 1000 зерен озимой пшеницы в зависимости от вариантов составила 33–41 г, то в благоприятные – 37–47 г, ярового ячменя соответственно – 34–40 и 45–49 г. Большие различия наблюдали также и в количестве зерен в колосе. Например, в колосе озимой пшеницы число зерен варьировало в зависимости от условий года от 20–23 до 26–35 шт.

Во все годы исследования наибольшую урожайность обеспечивали минеральные удобрения – средняя прибавка составила в посевах озимой пшеницы 66 и ярового ячменя – 52%.

Внесение комплекса микроэлементов на фоне НРК увеличивало среднюю прибавку урожайности озимой пшеницы на 12, ярового ячменя – 8%, при этом резких различий в их эффективности в зависимости от условий погоды не отмечено.

Эффективность регуляторов роста растений зависела от метеорологических условий года. В засушливые 2019 и 2021 г. прибавки урожая за счет их применения составили: озимой пшеницы – 16, ярового ячменя – 14%. В благоприятные годы – 2022 и 2023 г. – они были значительно меньше и не превышали для обеих культур 8%. Положительную роль регуляторов роста при стрессовых воздействиях засухи на растения отмечали также в работах [7, 11].

**Таблица 1.** Эффективность микроэлементов и регуляторов роста растений при возделывании озимой пшеницы сорта Московская 56 и ярового ячменя сорта Владимир

Вариант	Урожайность, ц/га						Окупаемость НРК зерном, кг/кг (среднее за 2017–2023 гг.)
	среднее за 2019–2021 гг.	прибавка, %	среднее за 2022–2023 гг.	прибавка, %	среднее за 2019–2023 гг.	прибавка, %	
<b>Озимая пшеница сорта Московская 56</b>							
Контроль (ХСЗР)	25.3	–	54.3	–	40.1	–	–
N120P60K90	43.7	–	83.6	–	65.5	–	9.4
N120P60K90 + микроэлементы	49.9	14	94.2	13	72.2	10	11.8
N120P60K90 + микроэлементы + + регуляторы роста	57.7	32	102	22	80.1	23	14.8
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	2.6		4.2		2.2–4.5		
<b>Яровой ячмень сорта Владимир</b>							
Контроль (ХСЗР)	24.2	–	43.0	–	33.8	–	–
N90P50K90	35.4	–	62.2	–	51.4	–	7.0
N90P50K90 + микроэлементы	37.9	7	67.9	9	55.7	8	8.1
N90P50K90 + микроэлементы + + регуляторы роста	43.3	23	73.0	17	60.8	18	11.0
<i>HCP</i> <sub>05</sub>	2.2		3.6		2.7–4.2		

Примечания. 1. ХСЗР – химические средства защиты растений. 2. 2019–2021 гг. – засушливые, 2022–2023 гг. – благоприятные годы.

При совместном применении микроэлементов и регуляторов роста средняя урожайность за все годы повысилась: озимой пшеницы – на 23, ярового ячменя – на 18% по сравнению с фонами минеральных удобрений.

В результате этого окупаемость НРК-удобрений прибавкой зерна увеличилась на 56.5% для обеих культур.

Применение комплекса микроэлементов и регуляторов роста улучшило минеральное питание растений, особенно при совместном их внесении, потребление (вынос урожая) азота, фосфора и калия в данном случае существенно увеличивалось: у озимой пшеницы на 24.3 и 23.0, у ярового ячменя – на 22.2 и 25.0% соответственно (табл. 2).

В связи с этим использование элементов питания из НРК-удобрений повысилось: растениями озимой пшеницы – в 1.6–1.7 раза, ярового ячменя – в 1.5–1.6 раза.

При расчете баланса элементов питания выявлено, что применение микроэлементов и регуляторов роста значительно снижало его интенсивность: азота – на 16, фосфора – на 30 и калия – на 20% (табл. 3).

Относительно высокий отрицательный баланс сложился для азота, интенсивность которого при внесении всех средств составила 63%, однако внесение N80

в среднем обеспечивало формирование высокой урожайности озимой пшеницы в благоприятные годы (102 ц/га), ярового ячменя (73 ц/га). Связано это, очевидно, с окультуренностью почвы данного опыта при содержании гумуса 1/85% и высокой обеспеченностью подвижными формами фосфора и калия, которые способствовали улучшению питания растений азотом, что отмечено также в работах [11, 12]. К тому же обеспеченность растений азотом повышалась и за счет биологического азота при наличии в севообороте клевера 2-годичного пользования до 2016 г. и гороха на зеленое удобрение в годы исследования. При посевах бобовых культур, по данным [13], биологический азот может уменьшить потребность растений в минеральном азоте до 50%.

Слабо отрицательным был баланс калия, что приемлемо при высокой обеспеченности подвижными формами этого элемента в почве опыта.

При значительном повышении урожайности от примененных средств повышались и показатели качества зерна (табл. 4)

Наибольшее и достоверное увеличение содержания белка в зерне обеих культур и клейковины в зерне озимой пшеницы обеспечило внесение минеральных удобрений. Применение микроэлементов в сочетании с регуляторами роста повысило содержание белка в зерне озимой пшеницы на 0.9, ярового

**Таблица 2.** Влияние микроэлементов и регуляторов роста на вынос элементов питания урожаем озимой пшеницы и ярового ячменя и использование их растениями (среднее за 2017–2023 гг.)

Вариант	Вынос, кг/га			Использование, %		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Озимая пшеница						
Контроль (ХСЗР)	99.8	36.8	68.5	–	–	–
N120P60K90	166	64.7	111	56	46	47
N120P60K90 + микроэлементы	181	75.6	122	68	65	60
N120P60K90 + микроэлементы + регуляторы роста	206	84.0	137	88	79	76
Яровой ячмень						
Контроль (ХСЗР)	86.0	30.2	58.2	–	–	–
N90P50K90	143	50.1	96.0	63	40	42
N120P60K90 + микроэлементы	159	56.2	111	81	52	58
N120P60K90 + микроэлементы + регуляторы роста	175	60.4	120	99	60	69

**Таблица 3.** Баланс элементов питания в зависимости от применения минеральных удобрений, микроэлементов и регуляторов роста растений (среднее за 2017–2023 гг.)

Вариант	Внесено, кг/га			Вынос, %			Интенсивность баланса, %		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Контроль (ХСЗР)	–	–	–	61.9	22.5	42.2	–	–	–
НРК	80	50	75	104	38.5	69.0	77	130	108
НРК + микроэлементы	80	50	75	114	43.9	77.5	70	114	96
НРК + микроэлементы + регуляторы роста	80	50	75	127	49.5	85.7	63	101	88

**Таблица 4.** Влияние удобрений, комплекса микроэлементов и регуляторов роста на показатели качества зерна (среднее за 2017–2023 гг.)

Вариант	Озимая пшеница		Яровой ячмень	
	белок, %	сырая клейковина, %	белок, %	экстрактивность, %
Контроль (ХСЗР)	11.3	21.7	9.9	68.7
НРК	13.1	27.8	11.3	66.9
НРК + микроэлементы	13.6	28.9	11.7	66.0
НРК + микроэлементы + регуляторы роста	14.0	29.4	12.0	65.2
НСР <sub>05</sub>	1.2–2.5	4.0–5.2	1.0–1.2	2.3–2.5

ячменя – на 0.7%, сырой клейковины в зерне озимой пшеницы – на 2.6%. При комплексном применении с минеральными удобрениями достигнуто максимальное содержание белка и клейковины в зерне озимой пшеницы, равное 14.0 и 30.4%, что соответствовало зерну 2-го класса. Зерно ярового ячменя, полученное в опыте, классифицировали по качеству как кормовое.

### ВЫВОДЫ

1. В длительном полевом опыте в течение 2017–2023 гг. на окультуренной дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве Центрального Нечерноземья выявлена высокая эффективность совместного применения комплекса микроэлементов (Микроэл, Аквамикс-СТ), регуляторов роста растений (Мивал-

агро, Мелафен, Зеребра-агро) и минеральных удобрений – урожайность озимой пшеницы достигала 80.1, ярового ячменя – 60.8 ц/га, в вариантах контроля – 40.1 и 33.8 ц/га соответственно.

2. Применение микроэлементов обеспечило повышение урожайности озимой пшеницы на 12, ярового ячменя – на 8% при уровне на фоне минеральных удобрений – 65.5 и 51.4 ц/га соответственно. При совместном их внесении с регуляторами роста увеличилась прибавка урожая озимой пшеницы – на 23, ярового ячменя – на 18%, окупаемость минеральных удобрений при этом увеличилась на 56 и 51%. Эффективность регуляторов роста в большей мере проявилась в засушливые годы.

3. Применение микроэлементов и регуляторов роста повышало коэффициент использования азота, фосфора и калия растениями озимой пшеницы и ярового ячменя в 1.5–1.7 раза. Существенное увеличение содержания белка и сырой клейковины в зерне обеспечило комплексное внесение минеральных удобрений, микроэлементов и регуляторов роста растений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кирюшин В.И.* Управление плодородием почв и продуктивностью агроценозов в адаптивно-ландшафтном земледелии // Почвоведение. 2019. № 9. С. 130–139.
2. *Ваулина Г.И., Алиев А.М., Самойлов Л.Н.* Роль комплексного применения средств химизации в повышении урожайности зерновых культур и окупаемости удобрений // Плодородие. 2016. № 5. С. 47–50.
3. *Кузьмич М.А., Капранов В.Н., Кузьмич Л.С., Орлова Т.Г.* Влияние удобрений и реакции почвенной среды на урожай и качество зерна ярового ячменя селекции Московского НИИСК “Немчиновка” // Плодородие. 2017. № 3. С. 1–3.
4. *Сандухадзе Б.И., Мамедов Р.З., Афанасьев Р.А., Коваленко А.А., Шатохин А.Ю.* Факторы урожайности озимой пшеницы в условиях Нечерноземья // Плодородие. 2021. № 3. С. 66–70.
5. *Аристархов А.Н.* Оптимизация полиэлементного состава в агросистемах России – агрохимическая оценка состояния дефицита, резервов, способов и средств его устранения / Под ред. В.Г. Сычева. М.: ВНИИА, 2019. С. 120–200.
6. *Мальцева Л.Т., Филимонова Е.А., Банникова Н.Ю.* Роль средств химизации при возделывании озимой пшеницы // Вестн. Рос. сел.-хоз. науки. 2022. № 2. С. 55–59.
7. *Синяшкин О.Г., Шаповал О.А., Шулаева М.М.* Инновационные регуляторы роста растений в сельскохозяйственном производстве // Плодородие. 2016. № 5. С. 38–42.
8. *Каргин В.И.* Структура продуктивности озимой пшеницы сорта Московская 39 в зависимости от внекорневой обработки био- и гуминовыми препаратами // Вестн. Урал. ГСХА. 2021. № 1. С. 55–59.
9. *Мухина М.Т., Можарова И.П., Коршунов А.А.* Эффективность применения удобрений на основе комплексов хелатов микроэлементов и аминокислот на озимой пшенице в Нижегородской области // Плодородие. 2020. № 6. С. 14–17.
10. *Тарасов С.С., Михалев Е.В., Речкин А.И., Круглова Е.К.* Регуляторы роста и развитие растений: Классификация, природа и механизм действия // Агрохимия. 2023. № 9. С. 65–80.
11. *Шафран С.А., Козинчева Е.С.* Продуктивность ярового ячменя и окупаемость азотных удобрений в зависимости от содержания элементов питания в основных типах почв России // Агрохимия. 2016. № 3. С. 11–22.
12. *Романенков В.А., Беличенко М.В., Рухович О.В., Никитищев Л.В., Иванова О.И.* Эффективность использования азота в длительных и кратковременных опытах Агрохимслужбы и Геосети Российской Федерации // Агрохимия. 2020. № 12. С. 28–37.
13. *Завалин А.А.* Биологический и минеральный азот в земледелии России. М.: ВНИИА, 2022. 256 с.

## Effectiveness of Trace Elements and Plant Growth Regulators in Combination with Mineral Fertilizers in the Cultivation of Winter Wheat and Spring Barley on Sod-Podzolic Soil

E. N. Starostina<sup>a, #</sup>, G. A. Ivashenkov<sup>a</sup>

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

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

In a long-term field experiment (61 years) on cultivated sod-podzolic loamy soil of the Central Non-Chernozem region high efficiency of the combined use of complexes of trace elements, growth regulators and mineral fertilizers was revealed. In this variant, the highest average yield for 2017–2023 was formed for winter wheat of the Moskovskaya 56 variety – 80 c/ha and spring barley of the Vladimir variety – 60 c/ha at 40.1 and 33.8 c/ha, respectively, in the version without fertilizers. The use of microelement complexes Microel in 2017–2019 and Aquamix-ST in 2020–2023 provided an increase in the average yield of winter wheat compared to the background of mineral fertilizers by 12%, and spring barley by 8%. When introducing trace elements in combination with plant growth regulators (Melafen in 2017–2019 and Zerebra-agro in 2020–2023), the yield increase was: winter wheat – 23%, spring barley – 18%, the payback of mineral fertilizers increased by 56–57%, and the utilization rate of nitrogen, phosphorus and potassium by plants – 1.5–1.7 times. The combined use of micronutrients, plant growth regulators and mineral fertilizers increased the protein content in winter wheat grain by 2.7%, crude gluten by 7.7%, and protein in barley grain by 2.1% compared to the control.

*Keywords:* winter wheat, spring barley, trace elements, growth regulators, yield, grain quality, balance of nutrition elements.

УДК 631.465:631.445.41:631.474

## ПРОТЕАЗНАЯ АКТИВНОСТЬ МУЧНИСТО-КАРБОНАТНЫХ ЧЕРНОЗЕМОВ ПРИ РАЗНЫХ ТИПАХ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ<sup>§</sup>

© 2024 г. Э. О. Чимитдоржиева\*

*Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН  
670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия**\*E-mail: erzhenach@mail.ru*

Исследовали протеазную активность черноземов мучнисто-карбонатных (Naplic Chernozem Hurocalcic) при различных типах землепользования – пашня, целина, залежь. Ареал исследования расположен в Тугнуйской котловине, Мухоршибирский р-н, Республика Бурятия. Активность фермента протеазы определяли методом аппликации с использованием фотопленки, которую закладывали в слой 0–20 см почвы. Наблюдения за протеазной активностью в первый год исследования показали, что максимум активности приходился на конец июля–начало августа. На пашне показатель был равен 35–39, на залежи – 34–36, на целине – 33–39%. На 2-й год исследования протеолитическая активность возрастала с начала вегетационного периода. Первый пик активности наблюдали во 2-й половине июля, что составило 44% на пашне, 43% – на залежи и 47% – на целине. Второй пик протеазной активности приходился на 2-ю половину августа и составил 30% на пашне, 35% – на залежи и 37% – на целине. В черноземах протеолитическая активность имела более высокие показатели на целине, ее интенсивность уменьшалась от пашни к залежи. Это свидетельствовало о средней протеолитической активности в черноземах мучнисто-карбонатных при различных типах землепользования. Очаговость и мозаичный характер были отмечены при гидролизе желатина в результате 10-суточной экспозиции во всех вариантах. Это свидетельствовало о неравномерном распределении ферментных систем в почвенной толще и наличии отдельных микрозон с различной активностью протеаз. Статистическая обработка данных показала, что активность протеаз зависела от гидротермических условий.

*Ключевые слова:* протеолитическая активность, черноземы, целина, залежь, пашня, Западное Забайкалье.

**DOI:** 10.31857/S0002188124080126, **EDN:** CDKZLA

### ВВЕДЕНИЕ

Важную роль в превращении азота в почвах играют ферменты, которые в азотном режиме почв определяют скорость процессов цикла трансформации азота, таким специфическим ферментом является протеаза [1]. Этот фермент активирует протеолиз, который служит инициатором для последующих этапов преобразования белков. Протеазная активность почвы является важным показателем, способствующим циркуляции иммобилизованного азота. Обработка почвы коренным образом влияет на ход и направление почвенно-биологических процессов, что отражается на интенсивности и направленности гидролиза азотистых соединений

в почве. Повышение ферментного потенциала достигается благодаря прогрессивной системе обработки почвы, которая улучшает агрофизические свойства, микробиологическую активность и плодородие почвы в целом [2].

Протеазы в почве происходят из ряда различных источников, включая микроорганизмы и растения [3–7]. Некоторые микобактерии и клостридии, выделенные из лесных почв, а также некоторые термотолерантные лигнинолитические грибы являются исключением среди большинства почвенных микроорганизмов, которые проявляют протеолитическую активность [8, 9]. Классификация, функции и регуляция активности протеаз из разных групп микроорганизмов были освещены в нескольких обзорах [10–12].

Микроорганизмы почв производят протеазы для разложения органического вещества почв, обеспечивая себя энергией [13]. Протеазы также играют роль в выживании микроорганизмов

<sup>§</sup> Работа выполнена по теме Госзадания № 121030100228-4 “Эволюционно-генетические, биогеохимические и продукционные функции почв Байкальского региона как компонента биосферы, оценка их ресурсного потенциала и разработка технологий рационального использования и охраны”.

в неблагоприятных условиях [14]. Оптимальный рН для каталитической активности микробных протеаз варьирует от 3.0 до 12.0 ед. [7], в то время как большинство микроорганизмов, выделенных из почвы, достигают оптимальной активности протеаз при рН 8.0–9.0 и температуре 40–60°C [15].

Протеазы и другие ферменты связаны с различными биотическими и абиотическими компонентами, включая активные и неактивные клетки, остатки клеточного материала, глинистые минералы, гуминовые коллоиды и водную фазу почвы. Размер и растворимость субстрата, тип микроорганизма и физическая и химическая природа почвенных коллоидов могут оказывать влияние на расположение ферментов [16].

Важно отметить, что ферменты, которые катализируют биохимические процессы в почве и участвуют в круговороте основных биогенных элементов, также могут быть использованы в качестве ранних индикаторов изменений типа землепользования [1, 17–21].

Интересно, что при распашке почв ферментативная активность снижается из-за уменьшения содержания органического углерода и микробиологической активности [22]. Возрастает ферментативная активность на единицу микробной биомассы при распашке лесной почвы [23]. Изменение структуры микробного сообщества может вызвать высокую ферментативную активность на единицу микробной биомассы в пахотных почвах [24]. Это может быть обусловлено уменьшением содержания микробной биомассы, увеличением скорости продуцирования ферментов микроорганизмами при обработке почв [23] или увеличением доступности питательных элементов. Кроме того, большая скорость синтеза новых ферментов может быть следствием более быстрой оборачиваемости микробной биомассы [25, 26].

Распашка приводит к изменению эрозионно-аккумулятивных процессов в почвах, что может усиливать либо, напротив, уменьшать уже существующие неоднородности ферментативной активности в разных элементах рельефа [27]. В ряде исследований показана зависимость ферментативной активности почвы от ее топографического положения [28–30].

Цель работы – определение протеазной активности мучнисто-карбонатных черноземов при разных типах землепользования.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования служили черноземы мучнисто-карбонатные различных типов землепользования – пахотные, целинные и залежные

Тугнуйской котловины (Мухоршибирский р-н, Республика Бурятия). Район исследования расположен в Забайкальской провинции промытых черноземов, в суббореальном поясе Центральной лесостепной и степной области. В соответствии с почвенным районированием [31], исследованная территория входит в Тугнуйско-Бичурский котловинный почвенный округ [32].

Активность фермента протеазы определяли методом аппликации с использованием фотопленки, которую закладывали в слой 0–20 см почвы ( $n = 5$ ). Экспозиция – 10 и 30 сут. После окончания срока экспозиции пленку аккуратно извлекали из почвы, промывали, сушили и взвешивали. По разнице в массе до и после экспозиции судили об активности фермента.

Черноземы в Бурятии имеют ограниченную площадь по сравнению с каштановыми почвами. Общая площадь черноземов составляет 96.59 тыс. га (4%): пашня – 77.32 тыс. га (80.1%), сенокосы – 0.50 тыс. га (0.5%) и пастбища – 18.77 тыс. га (19.4%). Распространение черноземов подчинено широтной зональности, которая нарушается условиями рельефа, но вертикальная зональность выражена более четко.

В Бурятии на Тугнуйском хребте находятся основные массивы черноземов, которые занимают более половины его восточной части. Также можно встретить узкую полосу черноземов на восточной части северных склонов Кударинской гряды и на южных склонах хребта Заганский, которые прилегают к Бичурской котловине и верховьям р. Уды на границе с Витимским плоскогорьем. Большая часть черноземов распахана.

В отличие от восточноевропейских “эталонов” условия формирования забайкальских черноземов характеризуются суровым климатом и режимом осадков. В первую очередь резко континентальный климат влияет на черноземы региона через жесткий гидротермический режим, который проявляется в промерзании почв на глубину до 240–270 см на протяжении 6–7 мес. Среднесуточная температура января составляет –23...–28°, а в некоторые годы может опускаться до –47...–54°. Коэффициент увлажнения весеннего и раннелетнего периодов в степях Бурятии крайне низкий и составляет 0.13–0.29, в то время как в период летнего увлажнения (июль–август) достигает единицы. Этот резкий контраст увлажнения отсутствует в других степных районах [33].

Разные авторы, изучившие черноземы региона, классифицировали их в самых различных вариантах: восточносибирские “промытые”, мучнисто-карбонатные, южные, обыкновенные, степные криоаридные. Согласно классификации 1977 г., тип почвы – чернозем мучнисто-карбонатный [34],

по классификации России 2004 г. – чернозем дисперсно-карбонатный (целина) и агрочернозем дисперсно-карбонатный (пашня) [35]. По WRB –  *haplic Chernozem Nypocalcic* [36].

Физико-химические характеристики определены классическими методами в почвоведении [37]. Температуру почвы определяли с помощью логгеров – комплекса TCR-0-U с регистратором DS1921, влажность почвы – с помощью портативного прибора Decagon с датчиком 5tm.

Полученные данные обработали методами математической статистики в среде электронной таблицы Microsoft Excel и Statistica 12.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследованные мучнисто-карбонатные черноземы характеризуется невысоким содержанием гумуса, имеют легкий гранулометрический состав и небольшую сумму поглощенных оснований (22.6–29.7 смоль(экв)/кг). Мощность гумусово-аккумулятивного горизонта не превышает 25–33 см, за которым следует небольшой горизонт В, промытый от карбонатов, а под ним находится карбонатный горизонт с мучнистыми скоплениями в мелкозем и натеками на щебенке. В профиле нет малорастворимых солей и гипсового горизонта. Верхние горизонты имеют нейтральную реакцию среды ( $pH = 6.7–6.9$  ед.), в то время как наличие карбонатов в средней и нижней частях

профиля обуславливает слабощелочную/щелочную реакцию почвенного раствора.

Результаты наблюдений за протеазной активностью (ПА) указывали на значительную изменчивость показателя на протяжении всего вегетационного периода. Протеазная активность была неодинаковой в различные периоды вегетации и в зависимости от сочетания погодных условий, видового состава и густоты растительного покрова, физиологического состояния растений и микробных сообществ имела ярко выраженную динамику.

Наблюдения за ПА в первый год исследования показали, что в начале периода на всех экспериментальных площадках показатели были низкими (рис. 1), что было обусловлено глубоким промерзанием почв и медленным весенним прогреванием. Лимитирующим фактором в этот период являлась температура почвы (рис. 2а), которая составляла 6.7–9.0°C при влажности почвы 10.1–7.1%. С повышением температуры в течение вегетации ПА постепенно повышалась.

Максимальная протеазная активность отмечена в конце июля–начале августа. На пашне показатель был равен 35–39, на залежи – 34–36, на целине – 33–39%. В конце августа–начале сентября наблюдали уменьшение ПА на пашне до 27, на залежи – до 33, на целине – до 30%. Далее к концу вегетационного сезона протеазная ПА уменьшалась до 9–11% в ряду целина–залежь–пашня.

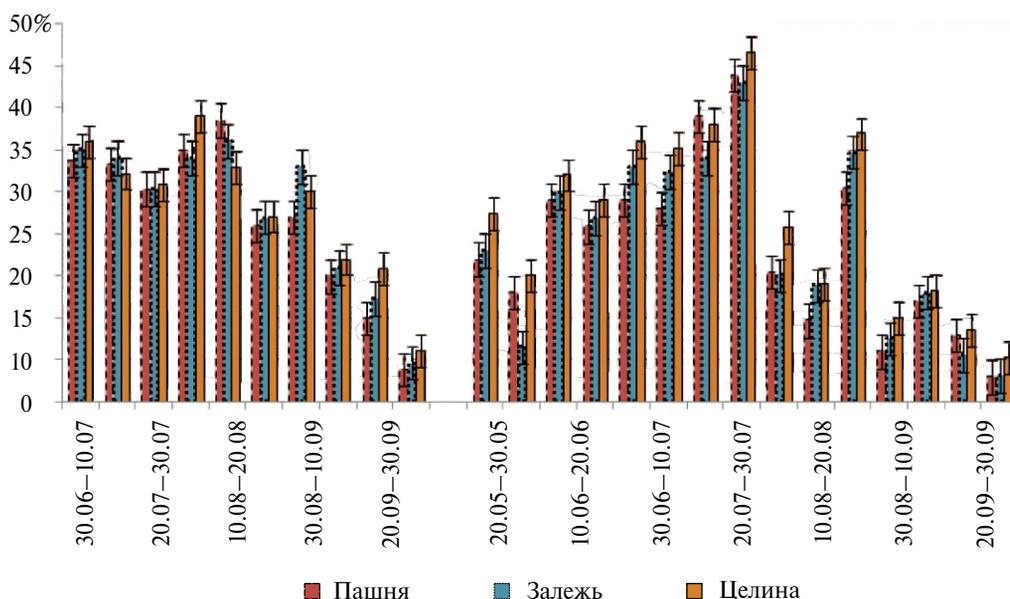


Рис. 1. Протеолитическая активность почв (2018–2019 гг.), %.

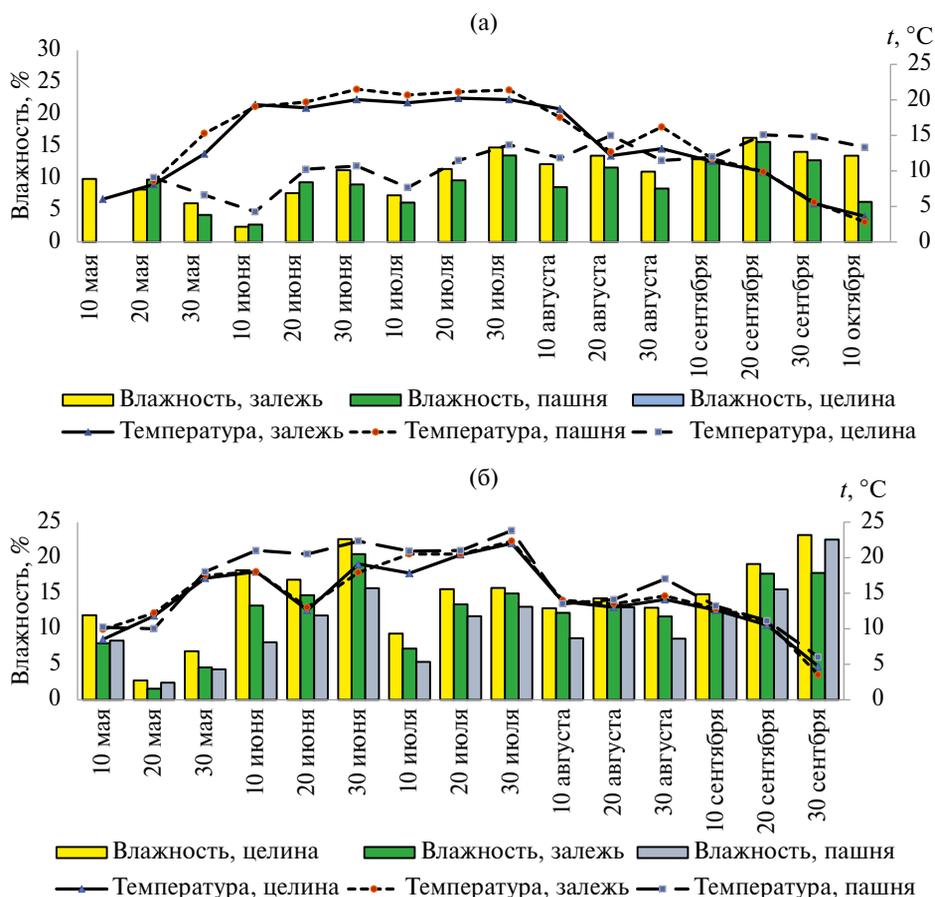


Рис. 2. Температура и влажность почвы: (а) – 2018 г., (б) – 2019 г.

В зависимости от типа землепользования наибольшую протеазную активность наблюдали в целинных почвах, чем в залежных и пахотных. Показатели протеазной активности почв различных угодий, измеренные в один период наблюдений при одинаковых погодно-климатических условиях, различались. Вероятно, это объясняется общим запасом живой биомассы, характером ее пространственного распределения и гумусированностью почв.

Коэффициенты вариации протеазной активности в вегетационном сезоне в основном варьировали от 5.1 до 19.6%. Корреляция ПА с температурой и влажностью почвы была высокой и составляла  $r = 0.83-0.99$ .

На 2-й год исследования ПА увеличилась с начала вегетационного периода. Первый пик активности наблюдали во 2-й половине июля, и он составил 44% на пашне, 43 – на залежи и 47 – на целине. Второй всплеск протеазной активности приходился на 2-ю половину августа и составлял 30% на пашне, 35 – на залежи и 37 – на целине.

Затем показатель снижился с незначительным пиком в середине сентября до 17, 18 и 18% соответственно. В начале октября ПА была низкой – 8, 8 и 10% соответственно. Отмечено, что совпадению оптимальных условий температуры и влажности (рис. 2б) соответствовала максимальная протеолитическая активность почв.

Во второй год исследования ПА имела более высокие показатели на целине, ее интенсивность уменьшалась от пашни к залежи. Причина этого заключалась в более динамичных условиях теплового и водного обмена, а также периодическом поступлении растительных остатков, которые определяли большую ПА этих почв. На пашне, из-за менее благоприятных физико-химических и гидротермических условий, наблюдали более низкие темпы минерализации желатина, при этом пик протеазной активности приходился на середину июля. Полученные данные указывали на средний уровень ПА в черноземах.

Коэффициенты вариации протеазной активности почв составляли 5.3–21.9%. Корреляция величины ПА с температурой и влажностью почвы была высокой и составляла  $r = 0.80–0.99$ .

Таким образом, при использовании аппликационного метода в почве была обнаружена топография распределения протеазной активности. Этот метод, помимо определения интенсивности протеолитических процессов, также позволил выявить качественные характеристики. Гидролиз желатина при 10-суточной экспозиции имел мозаичный характер и был неравномерно распределен в почвенной толще, указывая на наличие отдельных микрозон с различной активностью протеаз.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, протеазная активность мучнисто-карбонатных черноземов имела наибольшую интенсивность на целине и убывала в сторону залежей и пашни. Эти результаты свидетельствовали о средней протеазной активности в черноземах мучнисто-карбонатных при различных типах землепользования.

Очаговость и мозаичный характер гидролиза желатина в результате 10-суточной экспозиции были отмечены во всех вариантах опыта. Это свидетельствовало о неравномерном распределении ферментных систем в почвенной толще и наличии отдельных микрозон с различной активностью протеаз. Выявлено, что активность протеаз зависела от гидротермических условий и содержания органического углерода.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хазиев Ф.Х.* Системно-экологический анализ ферментативной активности почв. М.: Наука, 1982. 203 с.
2. *Савченко Л.А.* Протеолитическая активность типичного чернозема в условиях Центрально-Черноземного заповедника // Мат-лы научн. конф. "Флора и растительность Центрального Черноземья – 2010". Курск, 2010. С. 155–156.
3. *Milton D.K., Chawla R.K.* Cotton dust contains proteolytic and elastolytic enzymes not inhibited by alpha-1-proteinase inhibitor // *Am. J. Ind. Med.* 1986. № 9. P. 247–260.
4. *Sánchez-Ramos I., Hernández C.A., Castanera P., Ortego F.* Proteolytic activities in body and faecal extracts of the storage mite, *Acarus farris* // *Med. Vet. Entomol.* 2004. № 18. P. 378–386.
5. *Jedynak L., Kowalska J., Harasimowicz J., Golimowski J.* Speciation analysis of arsenic in terrestrial plants from arsenic contaminated area // *Sci. Total Environ.* 2009. № 407. P. 945–952.
6. *Kania K., Byrnes E.A., Beilby J.P., Webb S.A.R., Strong K.J.* Urinary proteases degrade albumin: implications for measurement of albuminuria in stored samples // *Ann. Clin. Biochem.* 2010. № 47. P. 151–157.
7. *Singh S.K., Singh S.K., Tripathi V.R., Khare S.K., Garg S.K.* A novel psychrotrophic, solvent tolerant *Pseudomonas putida* SKG-1 and solvent stability of its psychro-thermoalkalizable protease // *Proc. Biochem.* 2011. № 46. P. 1430–1435.
8. *Heyndrickx M.* The importance of endospore-forming bacteria originating from soil for contamination of industrial food processing // *Appl. Environ. Soil Sci.* 2011. ID561975.
9. *Cruz Ramírez M.G., Rivera-Rios J.M., Téllez-Jurado A., Gálvez A.P.M., Mercado-Flores Y., Arana-Cuenca A.A.* Screening for thermotolerant ligninolytic fungi with laccase, lipase, and protease activity isolated in Mexico // *J. Environ. Manag.* 2012. № 95. P. 256–259.
10. *Hotson A., Mudgett M.G.* Cysteine proteases in phytopathogenic bacteria: identification of plant targets and activation of innate immunity // *Curr. Opin. Plant Biol.* 2004. № 7. P. 384–390.
11. *Chandu D., Nandi D.* Comparative genomics and functional roles of the ATP-dependent proteases Lon and Clp during cytosolic protein degradation // *Res. Microbiol.* 2004. № 155. P. 710–719.
12. *Langklotz S., Baumann U., Narberhaus F.* Structure and function of the bacterial AAA protease FtsH // *Biochim. Biophys. Acta.* 2012. № 1823. P. 40–48.
13. *Rahman R.N.Z.R.A., Basri M., Salleh A.B.* Thermally stable alkaline protease from *Bacillus stearothermophilus* F1; nutritional factors affecting protease production // *Ann. Microbiol.* 2003. № 53. P. 199–210.
14. *Kim K.I., Park S.C., Kang S.H., Cheong G.W., Chung C.H.* Selective degradation of unfolded proteins by the self-compartmentalizing HtrA protease, a periplasmic heat shock protein in *Escherichia coli* // *J. Mol. Biol.* 1999. № 294. P. 1363–1374.
15. *Shankar S., Rao M., Laxman S.* Purification and characterization of an alkaline protease by a new strain of *Beauveria* sp. // *Proc. Biochem.* 2011. № 46. P. 579–585.
16. *Burns R.G.* Enzyme activity in soil: location and a possible role in microbial ecology // *Soil Biol. Biochem.* 1982. № 14. P. 423–427.
17. *Собина А.С., Хачиков Э.А., Шмараева А.Н., Федоренко А.Н., Приходько В.Д., Казеев К.Ш.* Биологическая активность чернозема обыкновенного

- через 5 лет после прекращения агрогенной обработки // *Агрохим. вестн.* 2022. № 1. С. 22–26.
18. Wang Q., Wang S. Response of labile soil organic matter to changes in forest vegetation in subtropical regions // *Appl. Soil Ecol.* 2011. № 47. P. 210–216. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.12.004>
  19. Burns R.G., DeForest J.L., Marxsen J., Sinsabaugh R., Stromberger M.E., Wallenstein M.D., Weintraub M.N., Zoppini A. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions // *Soil Biol. Biochem.* 2013. № 58. P. 216–234. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009>
  20. Yongxing C., Bing H., Fang L., Jiang M., Shen G., Yu J., Wang X., Zhu H., Wu Y., Zhang X. Extracellular enzyme stoichiometry reveals the carbon and phosphorus limitations of microbial metabolisms in the rhizosphere and bulk soils in alpine ecosystems // *Plant and Soil.* 2019. № 458. P. 7–20. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04159-x>
  21. Rosinger C., Rousk J., Sandén H. Can enzymatic stoichiometry be used to determine growth-limiting nutrients for microorganisms? – A critical assessment in two subtropical soils // *Soil Biol. Biochem.* 2019. № 128. P. 115–126. DOI: 10.1016/j.soilbio.2018.10.011
  22. Guan H.L., Fan J.W., Lu X. Soil specific enzyme stoichiometry reflects nitrogen limitation of microorganisms under different types of vegetation restoration in the karst areas // *Appl. Soil Ecol.* 2022. № 169. P. 104253. DOI: 10.1016/j.apsoil.2021.104253
  23. Medeiros E., Alcantara N.K., Barros J.A., Silva W., Silva A.O., Moreira K.A. Absolute and specific enzymatic activities of sandy entisol from tropical dry forest, monoculture and intercropping areas // *Soil Till. Res.* 2015. № 145. P. 208–215. DOI: 10.1016/j.still.2014.09.013
  24. Kivlin S.N., Treseder K.K. Soil extracellular enzyme activities correspond with abiotic factors more than fungal community composition // *Biogeochemistry.* 2014. № 117. P. 23–37. <https://doi.org/10.1007/s10533-013-9852-2>
  25. Beheshti A., Raiesi F., Golchin A. Soil properties, C fractions and their dynamics in land use conversion from native forests to croplands in northern Iran // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2012. № 148. P. 121–133. DOI: 10.1016/j.agee.2011.12.001
  26. Raiesi F., Beheshti A. Soil specific enzyme activity shows more clearly soil responses to paddy rice cultivation than absolute enzyme activity in primary forests of northwest Iran // *Appl. Soil Ecol.* 2014. № 75. P. 63–70. DOI: 10.1016/j.apsoil.2013.10.012
  27. Чернышева Е.В., Дуцанова К.С., Хомутова Т.Э., Борисов А.В. Микробная биомасса и ферментативная активность целинных и пахотных почв как показатели физиологического состояния микробных сообществ // *Усп. совр. биол.* 2023. Т. 143. № 4. С. 403–416. DOI: 10.31857/S0042132423040051
  28. Marinari S., Antisari L.V. Effect of lithological substrate on microbial biomass and enzyme activity in brown soil profiles in the northern Apennines (Italy) // *Pedobiologia.* 2010. № 53(5). P. 313–320. DOI: 10.1016/j.pedobi.2010.02.004
  29. Wickings K., Grandy S., Kravchenko A. Going with the flow: Landscape position drives differences in microbial biomass and activity in conventional, low input, and organic agricultural systems in the Midwestern US // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2016. № 218. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.agee.2015.11.005
  30. Wang M., Ji L., Shen F., Meng J., Wang J., Shan C., Yang L. Differential responses of soil extracellular enzyme activity and stoichiometric ratios under different slope aspects and slope positions in *Larix olgensis* plantations // *Forests.* 2022. № 13. P. 845. <https://doi.org/10.3390/f13060845>
  31. Макеев О.В., Ногина Н.А., Вторушин В.А. Своеобразие процессов почвообразования в мерзлотной тайге // Происхождение и свойства почв Забайкалья: докл. Бурят. почвоведов к IX Международ. конгр. почвоведов. Улан-Удэ, 1968. С. 102–107.
  32. Почвенно-географическое районирование СССР (в связи с сельскохозяйственным использованием земель) М.: Изд-во АН СССР, 1962. 422 с.
  33. Ногина Н.А. Почвы Забайкалья. М.: Наука, 1964. 312 с.
  34. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 224 с.
  35. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
  36. IUSS Working Group WRB. International Union of Soil Sciences (IUSS), Vienna, Austria. 2022. Available online: [https://wrb.isric.org/files/WRB\\_fourth\\_edition\\_2022-12-18.pdf](https://wrb.isric.org/files/WRB_fourth_edition_2022-12-18.pdf) (accessed 05 December 2023).
  37. Аринушкина Е.В. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1975. 488 с.

## **Protease Activity of Mealy-Carbonated Chernozems under Different Types of Land Use**

**E. O. Chimitdorzhieva<sup>#</sup>**

*Institute of General and Experimental Biology SB RAS,  
ul. Sakhyanovoy 6, Ulan-Ude 670047, Russia*

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

The protease activity of powdery carbonate chernozems (Haplic Chernozem Hypocalcic) was studied under various types of land use – arable land, virgin land, fallow. The research area is located in the Tugnui basin, Mukhorshibirsky district, Republic of Buryatia. The activity of the protease enzyme was determined by application using photographic film, which was laid in a layer of 0–20 cm of soil. Observations of protease activity in the first year of the study showed that the maximum activity occurred at the end of July–beginning of August. On arable land, the indicator was 35–39%, on fallow land – 34–36%, on virgin land – 33–39%. In the 2nd year of the study, proteolytic activity increased from the beginning of the growing season. The first peak of activity was observed in the 2nd half of July, which amounted to 44% in arable land, 43% in fallow, and 47% in virgin lands. The second peak of protease activity occurred in the 2nd half of August and amounted to 30% in arable land, 35% in fallow and 37% in virgin lands. In chernozems, proteolytic activity was higher in virgin lands, its intensity decreased from arable land to fallow lands. This indicated an average proteolytic activity in powdery carbonate chernozems under various types of land use. Focality and mosaic character were noted during gelatin hydrolysis as a result of 10-day exposure in all variants. This indicated an uneven distribution of enzyme systems in the soil column and the presence of separate microzones with different protease activity. Statistical processing of the data showed that the activity of proteases depended on hydrothermal conditions.

*Keywords:* proteolytic activity, chernozems, virgin soil, fallow, arable land, Western Transbaikalia.

УДК 631.416.13:632.122.1:631.86

## НИТРАТЫ И ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В АГРОЦЕНОЗАХ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ ОРГАНИЧЕСКИХ УДОБРЕНИЙ

© 2024 г. Г. Е. Мерзлая\*

*Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии  
им. Д.Н. Прянишникова**127434 Москва, ул. Прянишникова, 31 а, Россия**\*E-mail: lab.organic@mail.ru*

В полевых опытах на дерново-подзолистых почвах исследовали агроэкологическую эффективность длительного действия навоза крупного рогатого скота различной влажности. Показано, что применение полужидкого бесподстилочного и подстилочного навоза при оптимизации доз и сочетаний с минеральными удобрениями улучшало плодородие почв, повышало продуктивность сельскохозяйственных культур и севооборотов, обеспечивало экологическую безопасность агроценозов, снижало риски накопления нитратов и тяжелых металлов в почве и растениях. Ежегодное внесение в течение 15 лет полужидкого навоза в дерново-подзолистую тяжелосуглинистую почву в кормовом севообороте в варианте органо-минеральной системы удобрения с содержанием 240 кг N/га обеспечило их высокую эффективность – 9.8 т з.е./га, что было на 96% больше контроля. Полученный корм характеризовался высокой протеиновой питательностью, а по содержанию нитратов соответствовал нормам кормления сельскохозяйственных животных. Применение возрастающих доз полужидкого навоза повышало продуктивность кормового севооборота с 7.28 до 10.3 т з.е./га в вариантах с применением единичной (N120) до четырехкратной дозы (N580). Увеличение дозы навоза до N600 оказалось неэффективным. В зависимости от дозы навоза изменялось содержание нитратов в слоях почвенного профиля. Наиболее интенсивно (в 3.7 раза больше, чем в контроле) накапливались нитраты в слое 0–100 см почвы в варианте с максимальной дозой навоза (N600). При этом не отмечено превышения содержания нитратов в почве свыше ПДК (130 мг NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/кг). Установлена связь накопления нитратов от роста доз азота, внесенного с навозом, в почвенных слоях, особенно в верхних 0–100 и 100–200 см, при коэффициентах корреляции  $r = 0.73$  и  $0.60$ . При длительном применении подстилочного навоза на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве было эффективным его сочетание с минеральными удобрениями в дозе N180, где ежегодный сбор зерновых единиц в среднем за 37 лет составлял 3.1 т з.е./га, или превышал контроль на 38.5%. Растительная продукция при этом отличалась высоким качеством – в зерне содержалось до 14.2% белка, в клубнях картофеля – до 13% крахмала при допустимом уровне содержания нитратов. Содержание тяжелых металлов (Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, Hg) и мышьяка, а также нитратов в почве зависело от интенсивности удобрения подстилочным навозом, но в целом соответствовало допустимым нормам.

*Ключевые слова:* полужидкий и подстилочный навоз, дозы и сочетания с минеральными удобрениями, свойства почвы, агроценозы, урожайность, нитраты, тяжелые металлы.

**DOI:** 10.31857/S0002188124080136, **EDN:** CDJAW

### ВВЕДЕНИЕ

В обеспечении продовольственной безопасности страны большое внимание уделяется внедрению современных агротехнологий, в том числе включающих применение биологизированных систем удобрения с использованием навоза и других побочных продуктов животноводства. Вовлечение таких продуктов в сельскохозяйственный оборот может служить одним из главных факторов

улучшения плодородия пахотных земель, роста производства высококачественной продукции растениеводства при эффективной защите окружающей среды [1, 2].

В последние годы выход навоза и птичьего помета заметно увеличивается благодаря строительству и реконструкции животноводческих комплексов. В Российской Федерации насчитывается ≈14.6 тыс. животноводческих сельскохозяйственных организаций,

в том числе специализирующихся на содержании крупного рогатого скота –  $\approx 9$  тыс., свиней – 1.5 тыс., птицы – 0.9 тыс. В сельскохозяйственных организациях ежегодно образуется  $\approx 180$  млн т побочных продуктов животноводства, характеризующихся высокой удобрительной ценностью, наличием органического вещества и необходимых для растений питательных элементов.

Рядом научных учреждений (ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, ВНИИ органических удобрений и торфа и др.) разработаны научные основы биологизированных агротехнологий с использованием органических удобрений, позволяющие успешно применять их на сельскохозяйственных полях [2, 3–5]. Вместе с этим, нарушение практических рекомендаций, в частности, завышение доз внесения удобрений, может повлечь за собой негативные последствия, такие как избыточное накопление в почве и растениеводческой продукции различных токсических веществ – нитратов, тяжелых металлов и др. [6, 7].

Цель работы – в полевых опытах с применением полужидкого бесподстилочного и подстилочного навоза крупного рогатого скота оценить их действие в системе почва–растение как с агрохимических, так и экологических позиций, в частности, определили влияние внесения навоза на загрязнение почв и растительной продукции нитратами и тяжелыми металлами.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в полевых опытах на дерново-подзолистых почвах в Московской и Смоленской обл. Нечерноземной зоны Российской Федерации. В качестве органических удобрений использовали навоз крупного рогатого скота различной влажности. Из минеральных удобрений применяли аммоний азотнокислый ( $N_{aa}$ ), суперфосфат ( $P_{cd}$ ) и калий хлористый ( $K_x$ ).

В длительном полевом опыте в Московской обл. (1986–1992 гг.) исследовали действие полужидкого бесподстилочного навоза крупного рогатого скота при ежегодном внесении под культуры кормового севооборота. Навоз влажностью 90% содержал в среднем 0.33% общего азота, 0.43%  $K_2O$ , 0.16%  $P_2O_5$ , 0.6 мг  $Zn/kg$ , 0.2 мг  $Cu/kg$ , 0.2 мг  $Co/kg$ , 4.1 мг  $Mn/kg$ .

В длительном полевом опыте в Смоленской обл. (1979–2016 гг.) изучали агроэкологическую эффективность длительного применения подстилочного навоза крупного рогатого скота в полевом севообороте. При влажности 70% навоз содержал 0.5% общего азота, 0.2%  $P_2O_5$  и 0.7%  $K_2O$ , 60% органического вещества при отношении  $C : N$ , равном 20. Валовое содержание тяжелых металлов

(ТМ) в навозе было невысоким: 0.1 мг  $Cd/kg$ , 1 мг  $Cr/kg$ , 1.0 мг  $Ni/kg$ , 0.6 мг  $Cu/kg$ , 7 мг  $Zn/kg$  в расчете на сухое вещество.

Полевые эксперименты закладывали и проводили в соответствии с методическими указаниями Географической сети опытов с удобрениями ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова и методикой Б.А. Доспехова [8–10]. Более подробно методика исследования в опытах приведена при обсуждении их результатов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

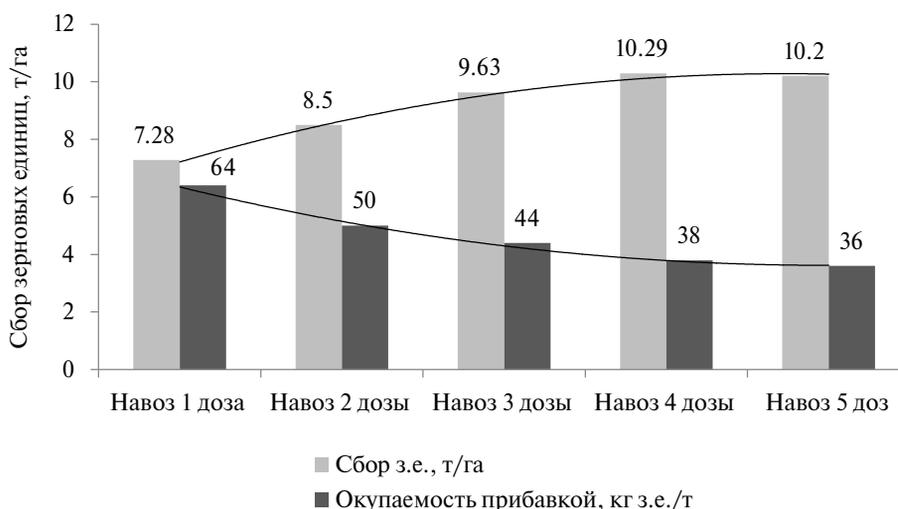
В полевом опыте ВНИИ агрохимии им. Д.Н. Прянишникова, выполненном в Московской обл. (пос. Барыбино), исследовали длительное действие полужидкого навоза крупного рогатого скота на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве. Почва содержала 2.2% гумуса, была слабо обеспечена подвижными соединениями фосфора и калия. Исследование вели в кормовом севообороте с возделыванием кукурузы в 2-х полях, викоовсяной смеси, многолетних злаковых трав 2-х лет пользования. Изучали возрастающие дозы навоза, а также системы удобрения: органическую (навоз 2 дозы, соответствующие  $N_{240}$ ), минеральную (НРК эквивалентно 2-м дозам навоза) и органо-минеральную (навоз 1 доза + НРК эквивалентно 1-й дозе навоза) с выровненным количеством основных питательных веществ. Удобрения в вариантах опыта вносили ежегодно в течение 3-х ротаций севооборота. Единичная доза навоза по содержанию азота соответствовала 120 кг  $N/га$ .

Опыт был заложен в четырехкратной повторности. Общая площадь делянки 96 м<sup>2</sup>. Размещение вариантов рендомизированное. Учет урожая проводили поделаяночно сплошным методом.

В опыте возделывали среднеранний гибрид кукурузы Днепровский 547 МВ, вику Льговскую, овес Орел, травосмесь, состоящую из тимopheевки луговой, овсяницы луговой, костреца безостого и ежи сборной.

Согласно результатам исследования, с ростом доз бесподстилочного навоза при длительном его применении среднегодовая продуктивность кормового севооборота возрастала с 7.28 т з.е./га в варианте с одной дозой до 10.3 т з.е./га при четырехкратной дозе, соответствующей  $N_{580}$  (рис. 1).

Дальнейший рост дозы навоза не приводил к достоверному увеличению продуктивности возделываемых культур. Окупаемость 1 т навоза прибавкой урожая с возрастанием дозы понижалась с 64 до 36 кг з.е. При этом на уровне нормативной (50 кг з.е. в расчете на 1 т навоза) она была при внесении навоза в двойной дозе ( $N_{240}$ ).



**Рис. 1.** Влияние возрастающих доз полужидкого навоза на продуктивность севооборота и окупаемость 1 т навоза.

Сравнительный анализ показал, что в вариантах исследованных систем удобрения (органической, минеральной и органо-минеральной), соответствующих по содержанию азота 240 кг/га, была получена урожайность культур севооборота в среднем за год соответственно 8.50, 9.86 и 9.84 т з.е./га, что больше контроля без внесения удобрений на 69–96%. При этом органическая система в варианте 2-х доз навоза по продуктивности севооборота уступала минеральной и органо-минеральной системам на 16%.

При рассмотрении действия ежегодно вносимого навоза на химический состав возделываемых культур установлено его положительное влияние на содержание в них сырого протеина (табл. 1).

Причем с ростом доз навоза прослежена тенденция к улучшению протеиновой питательности у кукурузы и многолетних злаковых трав. Более высокие показатели содержания протеина в кормовой массе наблюдали у всех культур при внесении минеральных удобрений.

Важно отметить, что повышение дозы навоза с единичной до пятикратной увеличивало накопление нитратного азота в зеленой массе кукурузы, а также в викоовсяной смеси и многолетних травах. Однако интенсивнее всего накапливался нитратный азот в кормах при применении полного минерального удобрения. Что касается меди и цинка, то их содержание в растительной массе испытанных культур мало изменялось при возрастании доз навоза, но, как правило, повышалось в вариантах с минеральными удобрениями.

В целом можно утверждать, что во всех вариантах применения органических и минеральных удобрений содержание нитратов и ТМ (меди

и цинка) в биомассе кормовых культур вполне соответствовало зоотехническим нормам кормления животных.

Ежегодное применение навоза в умеренных дозах положительно влияло на плодородие дерново-подзолистой почвы, оптимизировало ее гумусовое состояние и повышало обеспеченность подвижными соединениями фосфора и калия, что следует из данных, полученных в конце проведения полевого опыта (табл. 2).

Содержание минерального азота в пахотном слое почвы находилось в зависимости от возрастающих доз полужидкого навоза. Однако при ежегодном внесении даже высоких доз навоза в течение 3-х ротаций 5-польного севооборота загрязнения почвы нитратами не наблюдали. В варианте с максимальной, 5-кратной дозой навоза, соответствующей N600, содержание нитратного азота не превышало 17.6 мг/кг, что в 1.6 раза меньше ПДК, составляющей 29 мг N-NO<sub>3</sub>/кг, или 130 мг NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/кг (СанПиН 1.2.3685-21).

Заметных изменений в содержании подвижных меди и цинка в почве с ростом доз полужидкого навоза не отмечено (табл. 3).

При использовании средств химизации важное значение в экологическом отношении придается миграции нитратов по почвенному профилю. В приведенном полевом опыте определяли содержание нитратов в почве в слоях 0–100, 100–200, 200–300 и 300–400 см. При этом была выявлена четкая зависимость изменения данного показателя от вида удобрений и количества внесенного азота (рис. 2).

**Таблица 1.** Химический состав кормовых культур в зависимости от доз и сочетаний полужидкого навоза и минеральных удобрений

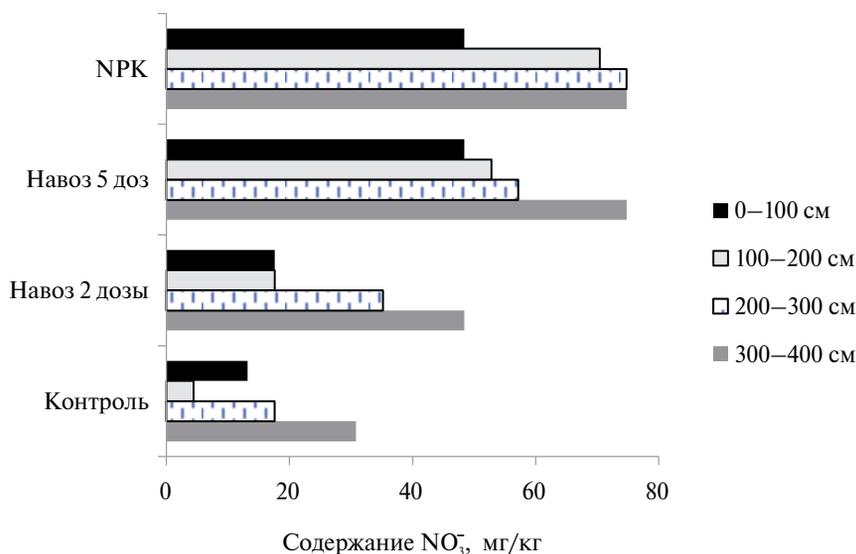
Вариант	Сырой протеин, %	N-NO <sub>3</sub> , %	Cu, мг/кг	Zn, мг/кг
<b>Кукуруза (зеленая масса)</b>				
Контроль без удобрений	7.8	0.04	4.7	20.0
Навоз 1 доза (N120)	9.6	0.10	4.1	18.6
Навоз 2 дозы (N240)	10.5	0.12	3.7	19.2
Навоз 5 доз (N600)	11.5	0.22	2.9	15.3
НРК эквивалентно 2-м дозам навоза	13.0	0.31	3.3	38.2
Навоз 1 доза + НРК эквивалентно 1-й дозе навоза	11.7	0.22	3.7	22.5
<b>Викоовсяная смесь</b>				
Контроль без удобрений	13.3	0.04	4.0	26.0
Навоз 1 доза (N120)	14.4	0.07	4.0	26.0
Навоз 2 дозы (N240)	15.5	0.14	6.0	26.0
Навоз 5 доз (N600)	14.4	0.20	5.0	27.5
НРК эквивалентно 2-м дозам навоза	15.0	0.28	5.0	35.0
Навоз 1 доза + НРК эквивалентно 1-й дозе навоза	15.4	0.19	5.0	27.5
<b>Многолетние злаковые травы</b>				
Контроль без удобрений	10.1	следы	4.8	17.5
Навоз 1 доза (N120)	10.4	следы	4.8	18.6
Навоз 2 дозы (N240)	11.8	следы	5.5	17.9*
Навоз 5 доз (N600)	14.3	0.05	5.2	19.4
НРК эквивалентно 2-м дозам навоза	15.3	0.19	5.6	22.4
Навоз 1 доза + НРК эквивалентно 1-й дозе навоза	13.7	0.08	5.1	19.9
Зоотехническая норма	14–15	0.5		
Максимально допустимый уровень			30	50

**Таблица 2.** Влияние длительного применения удобрений на свойства дерново-подзолистой почвы

Вариант	Гумус, %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , мг/кг	K <sub>2</sub> O, мг/кг
Контроль без удобрений	2.05	115	75
Навоз 1 доза (N120)	2.17	195	189
Навоз 2 дозы (N240)	2.48	237	318
Навоз 5 доз (N600)	3.24	489	740
НРК эквивалентно 2-м дозам навоза	2.07	314	404
Навоз 1 доза + НРК эквивалентно 1-й дозе навоза	2.44	331	367

**Таблица 3.** Содержание подвижных форм азота и тяжелых металлов в дерново-подзолистой почве при внесении возрастающих доз полужидкого навоза, мг/кг

Вариант	N-NH <sub>4</sub>	N-NO <sub>3</sub>	N-NH <sub>4</sub> + N-NO <sub>3</sub>	Zn	Cu
Без удобрений	5.4	7.7	13.1	1.3	3.4
Навоз 1 доза (N120)	6.7	8.3	15.0	1.2	3.3
Навоз 2 дозы (N240)	6.8	11.8	18.6	1.5	3.5
Навоз 3 дозы (N360)	6.1	17.4	23.2	2.2	3.8
Навоз 4 дозы (N480)	9.4	17.9	27.3		
Навоз 5 доз (N600)	7.9	17.6	25.5		
ПДК (СанПиН 1.2.3685-21)		29			



**Рис. 2.** Миграция нитратов по почвенному профилю в зависимости от применения навоза и минеральных удобрений.

По сравнению с контролем, где в верхнем слое 0–100 см почвы содержание нитратов составило 13,2, в глубоком слое 300–400 см – 30,8 мг NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/кг, отмечено повышение его содержания при внесении двойной дозы навоза (N240) соответственно до 17,6 и 48,4 мг NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/кг и еще большее увеличение при 5-кратной дозе навоза (N600) – до 48,4 и 57,2 мг NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/кг. Особенно сильно накапливались нитраты в варианте одностороннего применения минеральных удобрений (в дозе N240) – до 48,4 и 74,8 мг NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/кг. Однако даже интенсивное ежегодное внесение полужидкого навоза (в дозе N600) не приводило к накоплению нитратов в почвенном профиле сверх ПДК (130 мг NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/кг).

Корреляционный анализ также показал зависимость накопления нитратов в почвенных слоях от роста доз внесенного азота, особенно в верхних 0–100 и 100–200 см, где коэффициент  $r = 0.73$  и  $0.60$  соответственно. Таким образом, исследование показало значимый агроэкологический эффект использования полужидкого навоза крупного рогатого скота в умеренной по содержанию азота дозе (N240), обеспечившей высокую продуктивность кормового севооборота, получение экологически безопасной растительной продукции, а также улучшение агрохимических и санитарно-гигиенических свойств почвы.

Положительные результаты агроэкологической эффективности органических удобрений были получены и в другом длительном опыте, где использовали подстилочный навоз крупного рогатого скота, а также сочетания его с минеральными

удобрениями на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве.

Перед закладкой опыта почва содержала: гумуса – 1,4%, подвижного P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (по Кирсанову) – 15,9, K<sub>2</sub>O – 11,5 мг/кг при рН<sub>KCl</sub> 5,9 ед.

Навоз вносили в 1-й ротации севооборота под картофель и озимую пшеницу, во 2-й и 3-й ротациях – под картофель, в 4-й ротации – под озимую рожь. Площадь опытной делянки 112 м<sup>2</sup>, повторность вариантов трехкратная.

В течение 4-х ротаций полевого севооборота общей продолжительностью 30 лет изучали непосредственное действие удобрений, а в последней, 5-й ротации (в течение 7 лет) – последствие ранее внесенных удобрений при поддерживающей ежегодной азотной подкормке фоном в дозе N45.

Исследовали варианты удобрения: 1 – контроль, 2 – минеральная система (N90P90K90), 3 – органическая система (навоз 9 т/га), 4 – органо-минеральная система 1 (N30P30K30 + навоз 3 т/га), 5 – органо-минеральная система 2 (N60P60K60 + навоз 6 т/га), 6 – органо-минеральная система 3 (N90P90K90 + навоз 9 т/га), 7 – органо-минеральная система 4 (N120P120K120 + навоз 12 т/га), 8 – органо-минеральная система 5 (N150P150K150 + навоз 15 т/га). Чередование культур в 1-й ротации севооборота: картофель–ячмень–озимая рожь–горохоовсяная смесь–озимая пшеница–ячмень–многолетние травы 2-х лет пользования–озимая рожь–овес; во 2-й и 3-й ротациях: картофель–ячмень–многолетние травы 2-х лет пользования–озимая пшеница–овес; в 4-й

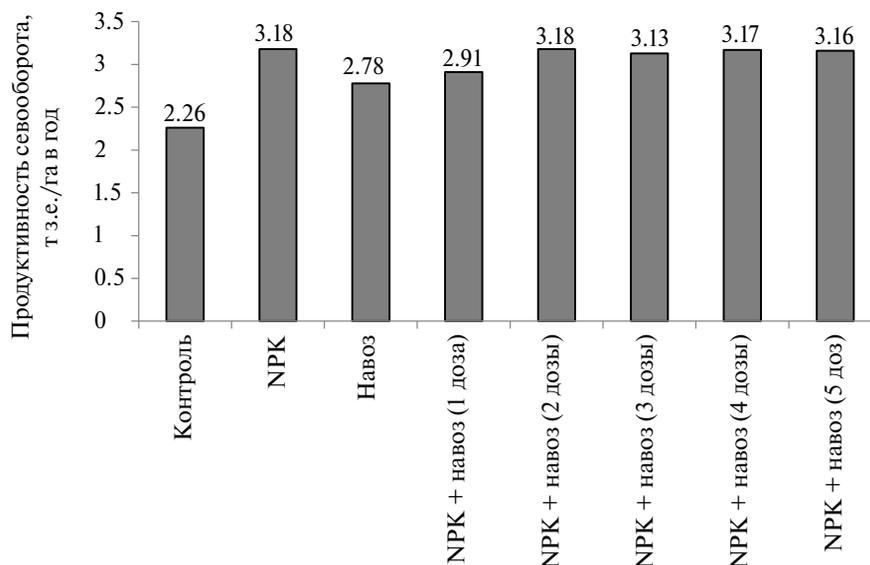


Рис. 3. Влияние подстилочного навоза и минеральных удобрений на продуктивность полевого севооборота.

и 5-й ротациях: овес на зеленый корм—озимая рожь—ячмень—многолетние травы 2-х лет пользования—яровая пшеница—овес.

При анализе длительного действия удобрений, в течение 37 лет, были получены достоверные прибавки урожайности полевых культур (при  $HCP_{05} = 0.37$  т з.е./га) во всех вариантах опыта (рис. 3).

В варианте применения только навоза в двойной дозе, соответствующей внесению 6 т навоза/га ежегодно, средняя продуктивность севооборота составила 2.78 т з.е./га, или на 23% больше контроля. При внесении минеральной системы, а также органо-минеральной системы 2, т.е. в вариантах с таким же количеством питательных элементов, как и в органическом варианте, ежегодная продуктивность севооборота находилась на уровне 3.18 т з.е./га, что на 40.7% превышало контроль без внесения удобрений. Дальнейший рост доз удобрений в органо-минеральных вариантах не сопровождался повышением урожайности культур севооборота.

Следует отметить, что преимущество совместного внесения органических и минеральных удобрений при оптимизации доз перед органической системой подтверждено данными других исследований. Например, в полевом опыте Института органического сельского хозяйства и Федеральной опытной станции по агроэкологии (Швейцария), где изучали различные агротехнологии (внесение только минеральных удобрений, минеральных удобрений на фоне навоза и только навоза), продуктивность 7-польного севооборота (озимая

пшеница (2 поля)—многолетние травы (2 поля)—картофель—сахарная свекла—озимый ячмень) в среднем за 21 год в традиционных вариантах была на 20% больше, чем в органическом варианте. При этом отмечали большие изменения продуктивности различных видов культур: от 10% — пшеницы и многолетних трав до 40% — картофеля [11].

В нашем опыте, наряду с продуктивностью севооборота, была проведена оценка качества экологической безопасности растительной продукции при возделывании зерновых культур и картофеля (табл. 4).

Согласно полученным результатам, содержание белка в зерне пшеницы, а также овса в вариантах органической системы удобрения было меньше, чем при использовании минеральной и органо-минеральной систем. В то же время у озимой ржи этот показатель при всех системах удобрения был практически одинаковым, но заметно меньше в контроле, где удобрения не применяли. По содержанию крахмала в клубнях картофеля преимущество оставалось за контрольным и органическим вариантами. В этих же вариантах в картофеле содержалось меньше всего нитратов. В других вариантах удобрения содержание нитратов в клубнях повышалось, но во всех случаях, кроме органо-минерального варианта с максимальными дозами, оно не превышало допустимых норм (250 мг  $NO_3^-$ /кг) [12]. Таким образом, повышенное содержание белка в зерновых культурах (озимой и яровой пшенице, озимой ржи, овсе) отмечено при внесении минеральных и органо-минеральных удобрений, а более высокое содержание крахмала

**Таблица 4.** Влияние навоза и минеральных удобрений на качество растительной продукции

Сельскохозяйственная культура	Показатель качества продукции	Варианты				
		Контроль	НРК	Навоз	НРК + навоз (3 дозы)	НРК + навоз (5 доз)
Пшеница яровая (зерно)	Белок, %	9.4	11.7	9.4	10.3	12.5
Пшеница озимая (зерно)	Белок, %	12.0	14.8	12.0	14.2	14.8
Рожь озимая (зерно)	Белок, %	8.7	8.2	8.0	8.0	8.3
Овес (зерно)	Белок, %	6.2	9.4	8.4	9.1	8.7
Картофель (клубни)	Крахмал, %	15.2	12.6	14.8	13.1	11.9
	Нитраты (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), мг/кг	143	190	179	250	282

и пониженное содержание нитратов в картофеле – в варианте органической системы.

В опыте изучали длительное действие удобрений на гумусовое состояние почвы. Через 37 лет исследования содержание гумуса в почве резко (на 29%) снизилось по сравнению с исходным в контроле, при внесении минеральной и органо-минеральной системы с низкими дозами удобрений и в меньшей мере – в органо-минеральных вариантах с более высокими дозами.

Скорость дегумификации почвенного органического вещества в конце опыта в контроле составляла 0.33 т/га/год. Наибольшей (0.42 т/га/год) она была при внесении одних минеральных удобрений, а в органическом и органо-минеральных вариантах находилась на более низком уровне.

Примененные в опыте удобрения при систематическом внесении влияли на содержание нитратного азота в почве (рис. 4).

В конце 3-й ротации полевого севооборота (в 2000 г.) при возделывании озимой пшеницы отмечено низкое содержание N-NO<sub>3</sub> в пахотном слое почвы (0–20 см) в апреле и его повышение в мае–июле по сравнению апрельскими показателями, причем во всех вариантах опыта, кроме одностороннего внесения навоза. При этом осенью, в октябре при обильных атмосферных осадках, превышающих среднеголетние нормы, содержание нитратного азота в верхнем слое почвы оставалось на том же уровне, как и в период вегетации, или даже было больше, что наблюдали в варианте применения органо-минеральной системы с высокими дозами удобрений и в контроле.

По окончании опыта в почвенных образцах определяли валовое содержание тяжелых металлов и мышьяка (табл. 5).

Исследование показало, что длительное применение удобрений под культуры севооборота мало влияло на накопление поллютантов в почве по сравнению с контролем, где удобрения

не вносили. Отмечено лишь некоторое повышение содержания кадмия с 0.36 в контроле до 0.44 мг/кг, а также цинка – с 70 до 72 мг/кг при внесении максимальных доз удобрений в варианте применения органо-минеральной системы. Увеличилось также содержание мышьяка при использовании органической и органо-минеральных систем с 3–5-кратными дозами навоза и минеральных удобрений до 0.6–1.1 мг/кг почвы при с 0.4 мг/кг в контроле. При этом, несмотря на систематическое применение удобрений в течение 37 лет, содержание тяжелых металлов и мышьяка в почве ни в одном из вариантов опыта не превышало ПДК/ОДК по СанПиН 1.2.3685-21 [13].

Растениеводческая продукция при внесении удобрений отличалась высоким качеством и была экологически безопасной по содержанию тяжелых металлов и мышьяка (табл. 6).

Например, в зерне овса – культуры, завершающей полевой севооборот, отмечено лишь некоторое увеличение по сравнению с контролем содержания кадмия, свинца и меди, а также мышьяка при внесении минеральной системы и органо-минеральных систем с умеренными и высокими дозами удобрений. Однако в целом в опыте во всех случаях в зерне овса не отмечено превышения допустимых уровней содержания тяжелых металлов и мышьяка.

Таким образом, исследованиями ВНИИ агрохимии им. Д. Н. Прянишникова в длительных полевых опытах с навозом крупного рогатого скота доказана высокая его эффективность при возделывании сельскохозяйственных культур на дерново-подзолистых почвах. Прибавки урожайности культур севооборотов от применения навоза по отношению к контролю составили 16.7–23.0%, от совместного его внесения с минеральными удобрениями при оптимизации доз – 35.2–40.7%, что почти в 2 раза больше, чем при применении органической системы удобрения. Повышалось плодородие почвы, улучшалось ее

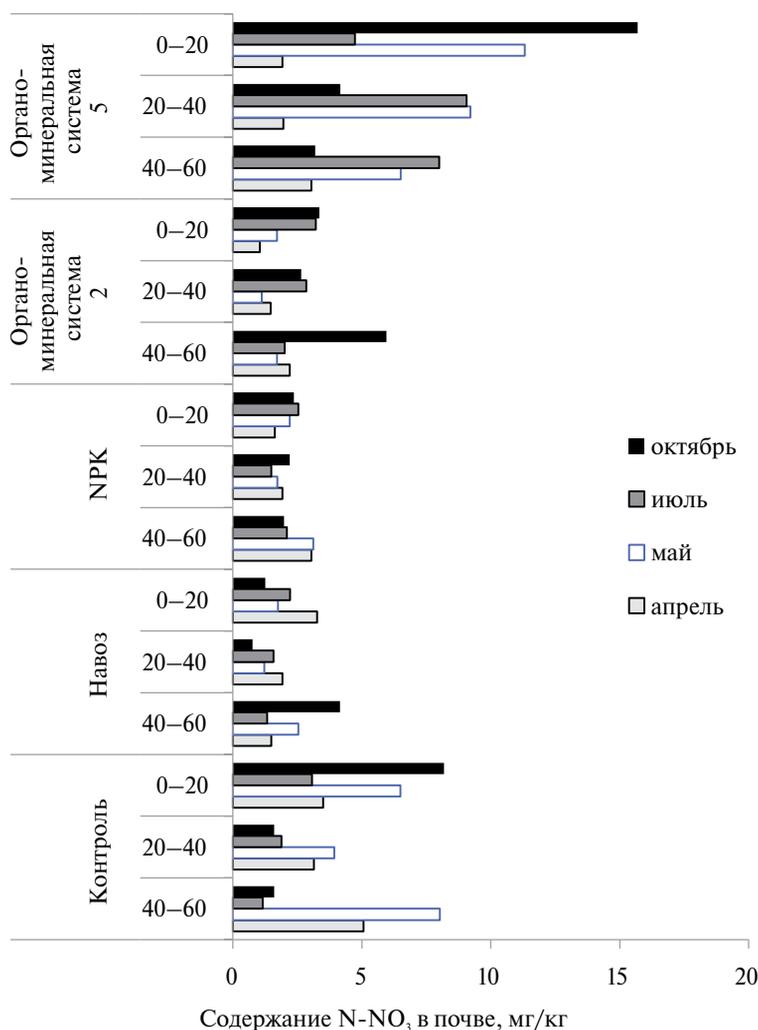


Рис. 4. Содержание нитратного азота в почве в зависимости от различных систем удобрения.

Таблица 5. Содержание тяжелых металлов и мышьяка в дерново-подзолистой почве, мг/кг сухой массы

Вариант, система удобрения	Cd	Pb	Zn	Cu	Ni	Hg	As
Контроль	0.36	24	70	12.5	16	0.01	0.4
Минеральная	0.35	23	68	12.8	16	0.02	0.3
Органическая	0.24	20	66	11.4	16	0.03	0.6
Органо-минеральная 3	0.27	21	69	12.1	17	0.01	1.1
Органо-минеральная 5	0.44	21	72	12.3	16	0.01	0.9
ПДК/ОДК (СанПиН 1.2.3685-21)	1.0	65	110	66	40	2.1	5.0

Таблица 6. Содержание тяжелых металлов и мышьяка в зерне овса в зависимости от интенсивности систем удобрения, мг/кг сухой массы

Вариант, система удобрения	Cd	Pb	Zn	Cu	Ni	Hg	As
Контроль	<0.01	0.06	17.6	3.46	2.99	<0.005	<0.01
Минеральная	0.03	0.17	24.1	2.24	2.29	<0.005	0.05
Органическая	0.01	0.06	12.6	2.25	2.15	<0.005	0.01
Органо-минеральная 3	0.03	0.11	18.3	2.09	2.61	<0.005	<0.01
Органо-минеральная 5	0.02	0.11	26.2	2.12	2.34	<0.005	<0.02
Допустимый уровень (СанПиН 2.3.2.1078-01)	0.1	0.5				0.03	0.2

гумусовое состояние, а также фосфатный и калийный режимы. При этом не отмечено избыточного накопления нитратов, тяжелых металлов и мышьяка в системе почва–растение, что свидетельствовало об экологической безопасности данных агроприемов.

## ВЫВОДЫ

1. В исследованиях с длительным применением органических удобрений (полужидкого и подстилочного навоза крупного рогатого скота) установлено, что при оптимизации доз и сочетаний навоза с минеральными удобрениями достигался высокий агроэкологический эффект, улучшались агрохимические и санитарно-гигиенические свойства почвы, повышались урожайность и качество культур севооборота при исключении рисков загрязнения поллютантами окружающей среды.

2. При длительном ежегодном внесении полужидкого навоза крупного рогатого скота на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве высокая продуктивность кормового севооборота, составившая в среднем за 15 лет 9.6 т з.е./га, что больше контроля на 96%, установлена в варианте применения органо-минеральной системы удобрения с содержанием азота 240 кг/га. Органическая система в варианте с двойной дозой навоза (N240) по продуктивности севооборота уступала органо-минеральной и минеральной системам (с таким же количеством азота) на 16%. Корма, полученные при совместном внесении навоза и минеральных удобрений, характеризовались высокой протеиновой питательностью и экологической безопасностью, не были загрязнены нитратами и тяжелыми металлами. Систематическое применение органо-минеральной системы удобрения с использованием полужидкого навоза в дозе 240 кг N/га повышало в почве содержание гумуса, подвижного фосфора ( $P_2O_5$ ) и калия ( $K_2O$ ) и не влияло существенно на накопление тяжелых металлов и нитратов.

3. При исследовании длительного действия возрастающих доз полужидкого навоза (со 120 до 600 кг N/га) установлен рост продуктивности севооборота с 7.28 до 10.3 т з.е./га в вариантах от единичной (N120) до четырехкратной дозы (N580). Дальнейшее увеличение дозы навоза не сопровождалось достоверным повышением продуктивности кормовых культур. Окупаемость 1 т навоза прибавкой урожая с возрастанием дозы снижалась с 64 до 36 кг з.е. Наиболее интенсивно (в 3.7 раза больше, чем в контроле) накапливались нитраты в слое 0–100 см почвы в варианте с максимальной дозой навоза (N600). Однако даже в этом случае не отмечено превышения содержания нитратов в почве сверх ПДК (130 мг  $NO_3^-$ /кг). Корреляционный

анализ показал зависимость накопления нитратов в почвенных слоях от роста доз внесенного азота, особенно в верхних 0–100 и 100–200 см, при коэффициенте  $r = 0.73$  и  $0.60$  соответственно.

4. Длительное применение подстилочного навоза было эффективным в сочетании с минеральными удобрениями в вариантах навоз 6–9 т/га + N60–90P60–90K60–90, где ежегодный сбор зерновых единиц в среднем за 37 лет исследований превышал 3 т/га. Растениеводческая продукция при этом отличалась высоким качеством. В зерне содержалось до 14% белка, в клубнях картофеля – до 13% крахмала при допустимом содержании нитратов. Содержание тяжелых металлов (Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, Hg) и мышьяка, а также нитратов в почве зависело, как правило, от интенсивности удобрения, но в целом соответствовало предельно допустимым концентрациям (по СанПиН 1.2.3685-21).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Прянишников Д.Н.* Избр. соч.-я. Т. 1. М.: Колос, 1965. 767 с.
2. Агрохимия. Классический университетский учебник для стран СНГ / Под ред. В.Г. Минеева, В.Г. Сычева, Г.П. Гамзикова. М.: ВНИИА, 2017. 854 с.
3. *Кидин В.В.* Система удобрения. М.: РГАУ–МСХА, 2012. 534 с.
4. *Державин Л.М., Афанасьев Р.А., Мерзлая Г.Е.* Методология комплексного применения удобрений и пестицидов в интенсивном земледелии. М.: ВНИИА, 2016. 337 с.
5. *Сычев В.Г., Шевцова Л.К., Мерзлая Г.Е., Беличенко М.В.* Оценка результатов мониторинга содержания и баланса гумуса в длительных опытах Гео-сети // Плодородие. 2017. № 6. С 28–30.
6. Биоконверсия побочных продуктов животноводства и отходов АПК: коллект. монограф. Владимир: ВНИИОУ – филиал Верхневолжского ФАНЦ. Иваново: ПресСто, 2023. 333 с. DOI: 10.51961/9785605088035
7. *Лукин С.М.* Агроэкологическое обоснование систем применения удобрений в севооборотах на дерново-подзолистых супесчаных и песчаных почвах: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2009. 49 с.
8. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследований. М.: Колос, 1979. 416 с.
9. Методические и организационные основы проведения агроэкологического мониторинга в интенсивном земледелии (на базе Географической сети опытов) / Под ред. Н.З. Милащенко, Ш.И. Литвака. М.: ВИУА, 1991. 354 с.

10. Программа и методика исследований в Географической сети полевых опытов по комплексному применению средств химизации в земледелии / Под ред. В.Д. Панникова, Д.А. Коренькова, А.В. Пухальского М.: ВАСХНИЛ, ВИУА, 1990. 187 с.
11. Горчаков Я.В., Дурманов Д.Н. Мировое органическое земледелие XXI века. Монография. М.: Изд-во ПАИМС, 2002. 402 с.
12. СанПиН 2.3.2.1078-01 “Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов”.
13. СанПиН 1.2.3685-21 “Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания” (с изменением на 30 декабря 2022 г.).

## Nitrates and Heavy Metals in Agroecosystems with Prolonged Use of Organic Fertilizers

G. E. Merzlaya<sup>#</sup>

*D.N. Pryanishnikov All-Russian Scientific Research Institute of Agrochemistry,  
ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127434, Russia*

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

In field experiments on sod-podzolic soils, the agroecological effectiveness of long-term action of cattle manure of various humidity was studied. It is shown that the use of semi-liquid bedless and litter manure, when optimizing doses and combinations with mineral fertilizers, improved soil fertility, increased the productivity of crops and crop rotations, ensured the environmental safety of agroecosystems, reduced the risks of accumulation of nitrates and heavy metals in soil and plants. The annual application of semi-liquid manure for 15 years to sod-podzolic heavy loamy soil in the forage crop rotation in the variant of the organo-mineral fertilizer system with a content of 240 kg N/ha ensured their high efficiency – 9.8 t c.u./ha, which was 96% more than the control. The resulting feed was characterized by high protein nutrition, and the nitrate content corresponded to the norms of feeding farm animals. The use of increasing doses of semi-liquid manure increased the productivity of forage crop rotation from 7.28 to 10.3 tons of grain/ha in variants using a single (N120) to a fourfold dose (N580). Increasing the dose of manure to N600 proved ineffective. Depending on the dose of manure, the nitrate content in the layers of the soil profile changed. Nitrates accumulated most intensively (3.7 times more than in the control) in a layer of 0–100 cm of soil in the variant with the maximum dose of manure (N600). At the same time, there was no excess of nitrate content in the soil above the MPC (130 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/kg). A correlation has been established between the accumulation of nitrates and the increase in nitrogen doses introduced with manure in soil layers, especially in the upper 0–100 and 100–200 cm, with correlation coefficients  $r = 0.73$  and  $0.60$ . With prolonged use of litter manure on sod-podzolic light loamy soil, its combination with mineral fertilizers at a dose of N180 was effective, where the annual harvest of grain units averaged 3.1 tons per hectare over 37 years, or exceeded the control by 38.5%. At the same time, vegetable products were of high quality – the grain contained up to 14.2% protein, potato tubers – up to 13% starch at an acceptable level of nitrate content. The content of heavy metals (Cd, Pb, Zn, Cu, Ni, Hg) and arsenic, as well as nitrates in the soil, depended on the intensity of fertilization with litter manure, but generally corresponded to acceptable standards.

*Keywords:* semi-liquid and litter manure, doses and combinations with mineral fertilizers, soil properties, agroecosystems, yield, nitrates, heavy metals.