

# СОДЕРЖАНИЕ

---

---

Номер 8, 2020

---

---

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

### Плодородие почв

- Миграционная подвижность органического вещества и Са  
в дерново-подзолистой супесчаной почве, произвесткованной различными дозами мела  
*А. В. Литвинович, О. Ю. Павлова, А. В. Лаврищев, В. М. Буре* 3
- Миграционные потоки, баланс и функции водорастворимых органических веществ  
в почвах таежных экосистем  
*И. М. Яшин, В. А. Черников, С. Л. Белопухов* 13
- Влияние биоугля на содержание минеральных форм азота  
в дерново-подзолистой супесчаной почве с разной степенью окультуренности  
*Е. Я. Рижия, Н. П. Бучкина, Е. В. Балашов* 22
- 

### Удобрения

- Продуктивность однолетних трав и клевера при последствии удобрений  
в зернопаропропашном севообороте в ЦЧР  
*О. А. Минакова, Л. В. Александрова, Т. Н. Подвигина* 30
- Повышение эффективности комплексного удобрения под лен-долгунец  
*Н. Н. Кузьменко* 37
- Эффективность удобрений в зернопаровом севообороте  
в разных зонах Курганской области  
*О. В. Волынкина, Ю. В. Суркова* 43
- Агрохимическая эффективность удобрительной композиции на посевах лука  
*С. Усманов, Г. Т. Омарова, О. В. Мячина, Ш. Байбацаева,  
Э. Н. Рамазанова, Г. К. Зулпанова* 51
- 

### Агроэкология

- Биологические приемы эффективного использования азота почвы, удобрений,  
симбиотической азотфиксации в полевых агроценозах  
*М. Н. Новиков* 60
- Агрохимические аспекты использования осадков сточных вод  
для рекультивации земель различного назначения  
*Г. Е. Мерзлая, Р. А. Афанасьев* 70
- Влияние воды, обработанной плазмой, на развитие растений  
*М. Ю. Андрианова, С. В. Коротков, Д. А. Коротков, Г. Л. Спичкин* 78
- 

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

- Программное управление параметрами плодородия почвы под посевами яровой пшеницы  
*И. М. Михайленко, В. Н. Тимошин* 86
- 

- Правила для авторов 94
- 
-

# Contents

---

---

No. 8, 2020

---

---

## EXPERIMENTAL ARTICLES

### Soil Fertility

- Migration Mobility of Organic Matter and Ca in Sod-Podzolic Sandy Loam Soil Produced by Different Doses of Chalk  
*A. V. Litvinovich, O. Yu. Pavlova, A. V. Lavrishchev, V. M. Bure* 3
- Migration Flows, Balance and Functions of Water-Soluble Organic Substances in Soils of Taiga Ecosystems  
*I. M. Yashin, V. A. Chernikov, S. L. Belopukhov* 13
- Effect of Biochar on the Content of Mineral Forms of Nitrogen in Sod-Podzolic Sandy Loam Soil with Different Fertility  
*E. Ya. Rizhiya, N. P. Buchkina, E. V. Balashov* 22
- 

### Fertilizers

- Productivity of Annual Grasses and Clover with After-Effect of Fertilizings in a Grain-Arable Crop Rotation of the Central Black-Earth Region  
*O. A. Minakova, L. V. Alexandrova, T. N. Podvigina* 30
- Increase of Efficiency of Application of Complex Fertilizer under of Fibre Flax  
*N. N. Kuzmenko* 37
- Action and Aftereffect of Steam in Different Zones of Kurgan Region  
*O. V. Volynkina, Yu. V. Surkova* 43
- Agrochemical Efficiency of Fertilizer Composition on One Crops  
*S. Usmanov, G. T. Omarova, O. V. Myachina, Sh. Baibachshayeva, E. N. Ramazanova, G. K. Zulpanova* 51
- 

### Agroecology

- Biological Methods of Effective Use of Nitrogen of Soil, Fertilizers, Symbiotic Fixation in Field Agroecosystems  
*M. N. Novikov* 60
- Agrochemical Aspects of Using Sewage Sludge for Reclamation of Land for Various Purposes  
*G. E. Merzlaya, R. A. Afanasiev* 70
- Effect of Plasma-Treated Water on Plant Development  
*M. Yu. Andrianova, S. V. Korotkov, D. A. Korotkov, G. L. Spichkin* 78
- 

## RESEARCH METHODS

- Software Management of Soil Fertility Parameters under Spring Wheat Crops  
*I. M. Mikhailenko, V. N. Timoshin* 86
- 
- Rules for authors 94
- 
-

## МИГРАЦИОННАЯ ПОДВИЖНОСТЬ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА И Са В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЕ, ПРОИЗВЕДКОВАННОЙ РАЗЛИЧНЫМИ ДОЗАМИ МЕЛА

© 2020 г. А. В. Литвинович<sup>1,\*</sup>, О. Ю. Павлова<sup>1</sup>, А. В. Лаврищев<sup>2</sup>, В. М. Буре<sup>1,3</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: avlavr@rambler.ru

Поступила в редакцию 15.11.2019 г.

После доработки 29.12.2019 г.

Принята к публикации 11.05.2020 г.

В модельном опыте на колонках проведено сопряженное изучение миграционной подвижности водорастворимых органических веществ (*ВОВ*) и кальция в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорированной научно обоснованной ( $0.9 H_r$ ) и завышенной ( $2.5 H_r$ ) дозами мела. За 16 промываний почвы, произвесткованной дозой мела  $0.9 H_r$ , было удалено 133 мг Са и 469 мг  $C_{орг}$ , из почвы, мелиорированной дозой мела  $2.5 H_r$  – 637 и 510 мг соответственно. Увеличение дозы мела в 2.7 раза привело к усилению миграции кальция в 4.8,  $C_{орг}$  – в 1.2 раза. Усиление миграции кальция влияло на элювиирование *ВОВ* в варианте с применением дозы мела, равной  $2.5 H_r$ , по сравнению с вариантом с научно обоснованной дозой мела и проявилось сильнее. Коэффициенты детерминации были равны  $R^2 = 0.81$  и  $R^2 = 0.41$  соответственно. Во всем промежутке времени изучения в почве варианта опыта с использованием мела в дозе  $0.9 H_r$  изменения показателя оптической плотности раствора *ВОВ* составили от 1.43 до 0.6, в варианте с дозой применения  $2.5 H_r$  – от 2.0 до 0.4 ед. Оптическая плотность мигрирующих растворов была достоверно статистически связана на высоком уровне значимости с мигрирующими *ВОВ* и Са. В варианте, мелиорированном дозой мела  $0.9 H_r$ , увеличение содержания кальция в дренирующих водах и снижение в них количества  $C_{орг}$  вызывало рост показателя оптической плотности растворов. В варианте с дозой мела, равной  $2.5 H_r$ , увеличение содержания кальция и снижение количества *ВОВ* в растворах сопровождалось снижением их оптической плотности.

**Ключевые слова:** известкование, кальций, водорастворимые органические вещества, миграция, математические модели.

**DOI:** 10.31857/S0002188120080049

### ВВЕДЕНИЕ

Дерново-подзолистые почвы характеризуются промывным типом водного режима. Среднеголетнее количество осадков, выпадающих на почвенную поверхность в таежно-лесной зоне, изменяется от 600 до 650 мм [1]. На транспирацию растениями и испарение с почвенной поверхности расходуется примерно 400 мм [2]. Оставшееся количество стекает с поверхности почвы и просачивается сквозь почвенно-грунтовую толщу, приводя к вымыванию растворенных элементов.

Из всех катионов, способных мигрировать в почвах, кальций отличается наибольшей подвиж-

ностью [3–5]. Высокую миграционную подвижность этого элемента в условиях промывного и периодически промывного водного режимов связывают с его большим ионным радиусом ( $1.06 \text{ \AA}$ ), что не позволяет Са прочно (необменно) закрепляться в почвах и участвовать в построении кристаллической решетки минералов [6], а также особым качеством гумуса, присутствующим в их составе. Гуминовые кислоты дерново-подзолистых почв обладают слабой способностью удерживать кальций в своем составе. Это создает предпосылки для его быстрого удаления за пределы почвенного профиля [7].

Водорастворимые органические вещества (**ВОВ**) являются неотъемлемой частью почвы. **ВОВ** диагностируются в корневых выделениях растений, активно формируются при разложении корневых и пожнивных остатков, являются одной из форм превращения гумусовых веществ. В составе гумуса доля **ВОВ** меняется от 0.05 до 1.0% [8]. Экспериментально установлено, что **ВОВ** дерново-подзолистых почв представлены фульвокислотами (**ФК**) с различной молекулярной массой, веществами фенольной и полифенольной природы, низкомолекулярными органическими кислотами, кислыми полисахаридами, аминокислотами [9]. Велика роль **ВОВ** в транспорте типоморфных элементов (Al, Mn, Fe) и элементов питания растений (Ca и Mg).

Для пахотных дерново-подзолистых почв характерны 2 группы элювиальных процессов. К первой группе относятся процессы, сопровождающиеся разрушением минеральной части почвы. Предпосылками для них являются: периодическое промывание профиля атмосферными осадками и наличие в растворе активно действующих органических веществ (**ОВ**). Среди **ВОВ** имеются соединения, в состав которых входят функциональные группы, определяющие способность таких соединений к образованию компонентов с поливалентными металлами [10]. Таким образом, **ОВ** почвенных растворов таежно-лесной зоны выступают как энергичные природные комплексообразующие вещества, удерживающие в почвенном растворе высвобождающиеся из кристаллической решетки ионы в форме устойчивых комплексных соединений.

Миграция Ca в составе органо-минеральных комплексов (**ОМК**) – стадийный физико-химический процесс, осуществляемый в почвах при вертикальном движении водного потока. На основе изучения взаимодействия **ФК**, выделенных из горизонта A1A2 дерново-подзолистой почвы, произвесткованной доломитизированным известняком, показано, что на первом этапе происходит сорбция **ФК** доломитом [11]. При этом мелиорант в процессе реального сорбционного взаимодействия мог нейтрализовать до 5.4% C углерода к общей его массе, находящейся в мобилизационном и миграционном потоках **ВОВ** дерново-подзолистой почвы, используемой в интенсивных системах земледелия. Далее происходила мобилизация в раствор катионов кальция с образованием водорастворимых органо-минеральных продуктов, отличавшихся устойчивостью и высокой миграционной способностью. Часть кальция в форме органо-минеральных соединений могла мигрировать в почву.

Примечательно, что ионы  $Ca^{2+}$ , мобилизирующиеся в растворимое состояние из доломита, способствовали перегруппировке молекулярных структур самих **ВОВ** и более активному формированию водорастворимых специфических соединений (фульво- и гуминоподобных веществ) [12].

Согласно современным представлениям, известкование приводит к перегруппировке в составе гумуса [7]. Часть наиболее химически “зрелых” нерастворимых в воде гуминовых кислот (**ГК-1** по терминологии И.В. Тюрина, находящихся в связи с полуторными оксидами в виде гетерополярных солей) после взаимодействия с кальцием приобретает способность к растворению (пептизации) в воде [13].

Исследования [12] также показали, что гидрогели **ГК** не являются сорбционным барьером для ионов кальция. Наоборот, присутствие гидрогелей **ГК** (наряду с порошком доломита) в несколько раз интенсифицировало потоки мобилизации и миграции кальция с гравитационной водой в зоне сорбционного взаимодействия. Высокая подвижность двухвалентных оснований при фульвокислотном разложении минералов установлена в работе [14]. Таким образом, часть гумусовых кислот дерново-подзолистых почв после взаимодействия с кальцием способна растворяться в воде и вовлекать в миграционные потоки определенное количество кальция.

После многократного промывания почвы, известкованной по  $0.9 H_r$ , количество вымытых **ГК-2** (по терминологии И.В. Тюрина, связанных с кальцием) уменьшилось на 23% от общего количества до промывания. В почве, мелиорируемой дозой, соответствующей  $2.5 H_r$ , потери составили 43%. Потери **ФК-2**, связанных с кальцием, в зависимости от варианта изменялись от 70 до 100% от исходного содержания [13].

Вторая группа элювиальных процессов – простое вымывание, которое не затрагивает минеральную часть почвы и происходит в ионной форме. В условиях известкования и применения возрастающих доз минеральных удобрений миграция кальция может осуществляться в соединениях с анионами сильных кислот (сульфатами, хлоридами, нитрат-ионами). В работе [15] установлена положительная корреляционная связь между содержанием в лизиметрических водах кальция и суммарным количеством  $SO_4^{2-}$  и  $Cl^-$  ( $r = 0.61-0.65$ ). Замена удобрений, содержащих в анионном составе  $SO_4^{2-}$ .  $Cl^-$  и  $NO_3^-$  на одно- и двухзамещенные фосфаты аммония и калия в количествах, эквивалентных 120 кг/га, в несколько

раз снижало непродуцируемые потери кальция из известкованных почв в лизиметрических опытах [4]. В литературе достаточно полно освещены вопросы о масштабах миграции кальция из почв с промывным типом водного режима. Подробная сводка этих публикаций приведена в работах [3–5].

Математические модели при описании миграции  $C_a$  и  $C_{орг}$  из мелиорируемых почв при многократном промывании использованы в работах [16–19]. Исследования, направленные на установление статистических связей между количеством элюируемого  $ОВ$  и выщелачиваемого  $Ca$  из мелиорируемых почв, нам неизвестны.

Цель работы – в лабораторном опыте на колонках провести сопряженное изучение миграционной подвижности  $C_{орг}$  и  $Ca$  в мелиорируемой почве.

Задачи исследования:

- установить масштабы миграции  $Ca$  и  $C_{орг}$  при многократном промачивании почвы, известкованной научно обоснованной и заведомо завышенной дозами мелиоранта, исследовать статистические связи между количеством выщелачиваемого кальция и вымываемого  $C_{орг}$ ;

- провести замеры оптической плотности ( $E_c^{мг/мл}$ ) растворов, мигрирующих из почвы при промывании;

- установить регрессионную зависимость между величиной  $E_c^{мг/мл}$  растворов, количеством удаляемых  $Ca$  и  $ВОВ$  при промывании;

- исследовать состав ОМК, осаждаемых из элюатов раствором щелочи.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования служила дерново-подзолистая супесчаная почва, отобранная под естественным многолетним лугом. Физико-химическая характеристика почвы:  $pH_{KCl}$  4.1,  $H_r$  – 5.4 ммоль(экв)/100 г почвы, гумус – 3.02%, содержание частиц размером  $<0.01$  мм – 18.6%. Содержание водорастворимого  $Ca$  – 12.6 мг/кг. Мелиорантом служил конверсионный мел – побочный продукт азотнокислой обработки фосфатного сырья при производстве минеральных удобрений. Содержание  $CaCO_3$  в меле – 90%. Мелиоративные свойства мела подробно описаны в работах [20–22].

Почву известковали дозами мела, соответствующими 0.9 и 2.5, рассчитанных от полной дозы  $H_r$ . Известкованную почву помещали в сосуды для проведения вегетационного опыта. Про-

должительность опыта 5 лет. Повторность опыта трехкратная. Методика, условия проведения опыта и динамика разложения мела в сосудах опыта подробно описаны в работах [22, 23].

После завершения вегетационного опыта и полного растворения мела, почву извлекали из сосудов и помещали в колонки для промывания. Масса почвы в каждой колонке – 600 г. Высота почвенного слоя – 18 см. Плотность набивки почвы в колонки – 1 г/см<sup>3</sup>. Повторность опыта четырехкратная. Перед началом промывания концентрация водорастворимого кальция в почве, известкованной мелом в дозе 0.9  $H_r$  была равна 160, в дозе, соответствующей 2.5  $H_r$ , – 660 мг/кг. Почву в колонках насыщали дистиллированной водой до появления первой капли просочившейся влаги. Далее проводили промывание.

Для каждого промывания использовали 400 мм воды. Расчет количества влаги, необходимого для одного промывания, приведен в работах [22, 24]. Всего проведено 16 промываний. Общий объем просочившейся влаги 6.4 л. Продолжительность эксперимента – 1.5 мес. Перерыв между отдельными промываниями – 1–2 сут.

В каждой порции фильтрата устанавливали содержание  $C_{орг}$  (по Тюрину), предварительно выпаривая аликвоту на водяной бане. Также определяли содержание кальция трилонометрическим методом и оптическую плотность раствора согласно [25].

Определение оптической плотности предусматривает доведение элюата раствором 0.1 н. NaOH до pH 13.0. При добавлении щелочи в фильтрат первой промывки варианта опыта с известкованием по 2.5  $H_r$  выпал хлопьевидный осадок бурого цвета. Он был отделен от раствора, высушен и растворен в 0.1 н. NaOH. После растворения осадка в нем была установлена оптическая плотность. Кроме того, в осадке определяли содержание  $Ca$  и  $C_{орг}$ . В надосадочной жидкости также определяли концентрацию  $Ca$ , содержание  $C_{орг}$  и оптическую плотность ( $E_c^{мг/мл}$ ). Математическую обработку проводили по методике [26].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные изучения миграционной подвижности кальция и  $ВОВ$  сведены в табл. 1. Результаты показали, что количество вымываемого кальция в опыте зависело от его исходного содержания в почве и объема просочившейся влаги. Максимальное содержание вымытого кальция пришлось на первое промачивание. По мере проведения эксперимента концентрация кальция в про-

**Таблица 1.** Оптическая плотность элюатов, количество вымываемых *ВОВ* и Са из дерново-подзолистой почвы, известкованной различными дозами мела

№ промывания	Известкование по 0.9 $H_r$			Известкование по 2.5 $H_r$		
	$E_c^{мг/мл}$	<i>ВОВ</i>	Са	$E_c^{мг/мл}$	<i>ВОВ</i>	Са
		мг			мг	
1	1.59	78.0 ± 5.3	64.0 ± 4.9	Не определяли	168 ± 12	462 ± 13
2	1.20	37.8 ± 3.0	16.0 ± 2.5	1.65	75.0 ± 5.0	30.0 ± 6.3
3	1.35	27.0 ± 1.2	8.0 ± 1.1	2.2	37.5 ± 4.3	18.0 ± 3.4
4	1.38	16.0 ± 1.6	4.0 ± 0.4	1.4	27.5 ± 4.3	14.0 ± 2.5
5	1.43	16.5 ± 2.3	3.2 ± 0.2	1.4	20.0 ± 0.8	8.8 ± 1.1
6	1.05	23.3 ± 5.8	4.8 ± 0.3	1.8	20.0 ± 0.1	10.0 ± 1.0
7	1.30	19.3 ± 4.6	4.0 ± 0.2	1.7	26.5 ± 2.2	8.4 ± 0.3
8	0.65	38.5 ± 3.4	4.8 ± 0.2	2.0	23.0 ± 9.3	6.8 ± 1.1
9	1.08	17.0 ± 1.4	2.4 ± 0.1	1.7	19.0 ± 8.6	7.9 ± 1.3
10	0.78	15.3 ± 7.0	2.2 ± 0.1	1.0	18.5 ± 3.0	12.8 ± 1.9
11	0.60	44.5 ± 3.2	6.1 ± 0.5	0.7	16.8 ± 1.9	10.9 ± 0.9
12	0.08	29.3 ± 1.9	3.9 ± 0.3	0.4	13.8 ± 1.8	12.2 ± 1.2
13	1.03	17.3 ± 0.4	2.7 ± 0.1	1.0	12.3 ± 2.3	9.3 ± 1.5
14	1.03	16.5 ± 3.5	2.3 ± 0.2	0.6	12.0 ± 0.7	7.7 ± 0.8
15	0.83	17.0 ± 5.0	1.8 ± 0.1	0.5	10.0 ± 1.2	7.7 ± 0.7
16	0.75	15.3 ± 3.7	3.0 ± 0.3	0.7	10.6 ± 1.6	10.9 ± 0.8
Сумма, мг	—	469	133	—	510	637

мывных водах снижалась. За 16 промываний из почвы, произвесткованной дозой мела, соответствующей 0.9  $H_r$ , было удалено 133 мг Са, из почвы, мелиорированной дозой мела 2.5  $H_r$ , — 637 мг. Следовательно, увеличение дозы мела в 2.7 раза усилило выщелачивание кальция в 4.8 раза.

При промывании почвы, произвесткованной мелом по 0.9  $H_r$ , количество водорастворимого кальция в ней снизилось за 16 промывок со 160 до 21 мг/кг (на 84% от исходного содержания). В варианте с почвой, мелиорируемой дозой мела равной 2.5  $H_r$ , концентрация кальция уменьшилась с 660 до 22 мг/кг (на 97% от исходного содержания). Таким образом, в обоих вариантах опыта количество кальция, извлекаемого дистиллированной водой, установилось на уровне 21–22 мг/кг почвы. Следовательно, несмотря на значительные потери кальция из почвы вследствие вертикальной миграции полного удаления водорастворимых соединений этого элемента ни в одном из вариантов опыта достичь не удалось. Известно, что в почвах существует буферная система: кальций обменный ↔ кальций почвенного раствора, позволяющая поддерживать наличие в ней определенного количества водорастворимого кальция. Математические модели, описывающие во времени процессы миграции кальция из почвы, ме-

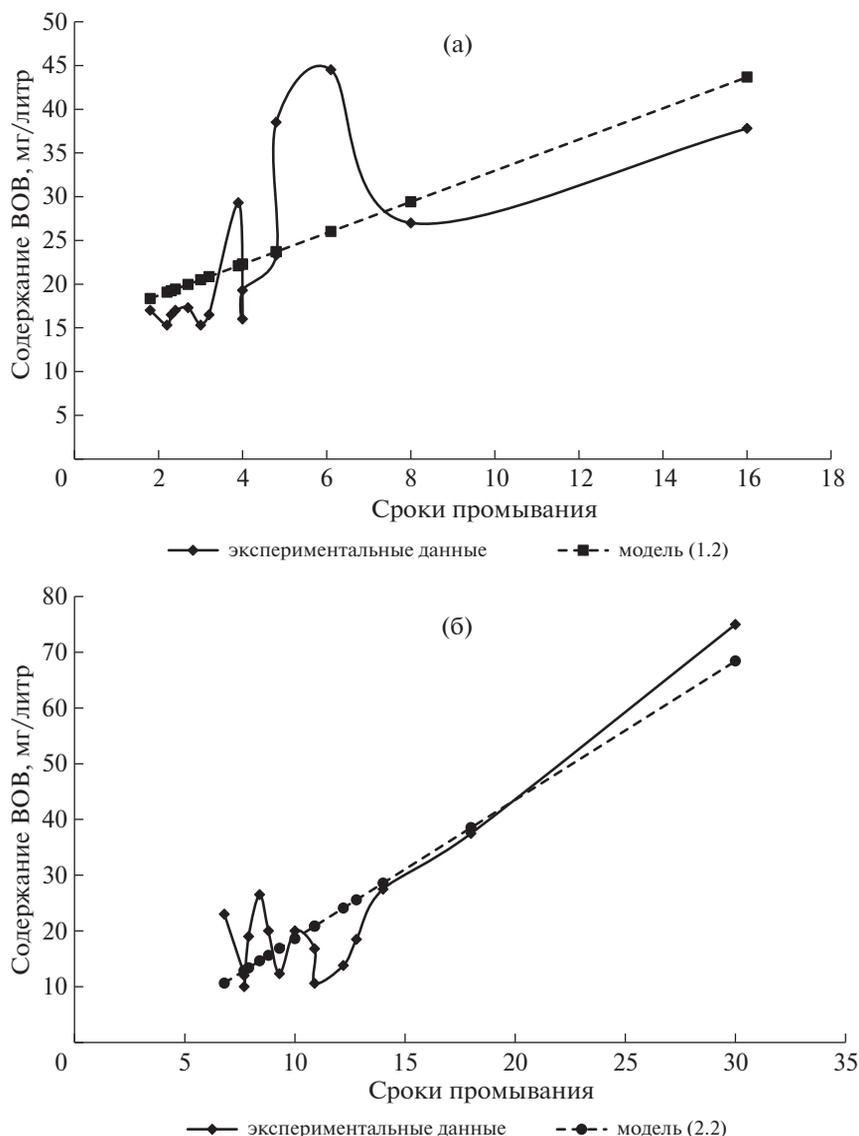
лиорируемой различными дозами мела, приведены в работах [16, 17].

Данные содержания  $C_{орг}$  в промывных водах свидетельствовали, что *ВОВ* присутствовали во всех порциях фильтратов (табл. 1). Вне зависимости от варианта опыта максимальное содержание  $C_{орг}$  пришлось на первую промывку. По мере проведения эксперимента концентрация *ВОВ* снижалась. Полного удаления  $C_{орг}$  за 16 промываний ни в одном из вариантов опыта достичь не удалось.

Общее количество  $C_{орг}$ , удаленного из почвы варианта, мелиорируемого дозой мела, равной 0.9  $H_r$ , составило 469 мг, из почвы варианта с заведомо завышенной дозой мелиоранта — 510 мг. Таким образом, увеличение дозы мелиоранта в 2.7 раза усилило миграцию *ВОВ* в 1.2 раза. Следовательно, миграционные потери  $C_{орг}$  при увеличении дозы мела были не пропорциональны потерям кальция.

Эмпирические модели, описывающие общую динамику вымываемого *ВОВ* в отдельных вариантах опыта во всем промежутке времени изучения приведены в работе [19].

В первой порции фильтрата содержания кальция и *ВОВ* значительно превосходили величины этих показателей в растворах всех остальных хро-



**Рис. 1.** Зависимость элювируемого *ВОВ* от количества выщелачиваемого Са при многократном промывании почвы, мелиорированной дозами мела  $0.9 H_T$  (а),  $2.5 H_T$  (б).

ков промывания. Поскольку наличие таких величин может исказить анализ данных опыта, при построении моделей данные первого промывания были исключены из рассмотрения.

Парная линейная регрессия *ВОВ* ( $y_1$ ) на Са ( $x$ ) без данных первой промывки в варианте опыта с известкованием по  $0.9 H_T$  описывается уравнением (1):

$$y_1 = 15.15 + 1.78x, \tag{1}$$

где  $x$  – содержание Са.

Коэффициент  $b = 1.78$  показывает, на сколько единиц в среднем в диапазоне изменения содержания Са в опыте за 15 промываний увеличивалось содержание *ВОВ* при увеличении содержания Са в элюатах на одну единицу.

Модель (1) статистически значима на высоком (1%-ном) уровне значимости.  $F$ -статистика принимает величину  $F = 9.3$ . При этом критическая величина статистики для уровня значимости 1% принимает величину  $F(0.99, 1.13) = 9.07$ . Коэффициент детерминации  $R^2 = 0.41$ . Исходные данные и график парной линейной регрессии приведены на рис. 1а.

Парная линейная регрессия *ВОВ* ( $y_2$ ) на Са ( $x$ ) в варианте опыта, известкованного по  $2.5 H_T$ , описывается уравнением (2):

$$y_2 = -6.28 + 2.49x, \tag{2}$$

где  $x$  – содержание Са.

Коэффициент  $b = 2.49$  показывает, на сколько единиц в среднем в диапазоне изменения  $S_a$  в опыте увеличивалось содержание  $BOB$  при увеличении содержания  $S_a$  в элюатах на одну единицу.

Модель (2) статистически значима на очень высоком 0.001%-ном уровне значимости.  $F$ -статистика принимает величину  $F = 55.43$ . При этом критическая величина статистики для уровня значимости 0.001% принимает величину  $F(0.99999, 1.13) = 48.36$ . Коэффициент детерминации  $R^2 = 0.81$  также высок для линейной модели. График модели (2) представлен на рис. 1б.

Построенные эмпирические модели (1) и (2) имеют высокую статистическую значимость. Можно говорить о наличии очень сильной статистической взаимосвязи линейного характера между мигрирующими  $S_a$  и  $BOB$ .

Угловой коэффициент в модели (2) оказался существенно больше, чем в модели (1). Следовательно, усиление миграции кальция при использовании мела в заведомо завышенной дозе на элюирование  $BOB$  проявляется сильнее.

Одной из задач исследования было установление качественного состава просачивающейся влаги по данным оптической плотности растворов. Физико-химическую основу показателя  $E_c^{mg/ml}$  можно определить как интенсивность окрашивания щелочного раствора  $OB$  на единицу углерода. Чем более темную окраску имеет раствор, тем больше в нем содержится  $S_{орг}$ . При равной концентрации  $S_{орг}$  в растворе величина  $E_c^{mg/ml}$  зависит от глубины гумификации (ароматизации) находящихся в нем гумусовых веществ. Считается установленным, что оптическая плотность гуминовых кислот дерново-подзолистых почв укладывается в диапазон от 4 до 19 ед.  $E_c^{mg/ml}$  ФК меняется от 1 до 4 ед. [7].

Фульвокислотный состав  $OB$  в водах, дренирующих подзолистые почвы, не является однородным и отличается по молекулярной массе от фульвокислотного состава почв [27]. Проведенное разделение на сефадексе G-25 водорастворимых  $OB$  почвенных растворов из горизонта A1 подзола глееватого позволило выявить 5 фракций, различающихся по молекулярной массе [28].

Данные наших исследований свидетельствовали, что мигрирующие в почве органо-минеральные комплексы отличались большой неоднородностью. В почве варианта, произвесткованного дозой, соответствующей 0.9  $H_r$ , во всем промежутке времени изучения оптическая плотность менялась в диапазоне от 1.43 до 0.60 ед., в

варианте с дозой мела, равной 2.5  $H_r$ , — от 2.2 до 0.4 ед. Таким образом, в ряде промывок показатель  $E_c^{mg/ml}$  не достигал величин, характерных для ФК.

По мере проведения эксперимента вне зависимости от варианта опыта наблюдали тенденцию к снижению оптической плотности водных растворов. Вероятно, в процессе миграции в почве  $BOB$  происходило упрощение их состава, а высокомолекулярные фракции ФК распались на менее сложные составляющие. Например, в работе [27] показано, что при миграции ФК по профилю дерново-подзолистой почвы происходило изменение их состава до формирования наименее низкомолекулярных фракций, обладающих повышенной миграционной способностью.

Роль низкомолекулярных органических кислот в перемещении кальция в проведенных исследованиях осталась не выясненной. По данным работы [29], лимонная кислота обладает ограниченной способностью переводить  $S_a$  в раствор из минералов. По мнению [30], все минеральные компоненты природных вод связаны с ФК. Для ответа на этот вопрос нужны специальные исследования.

Регрессионная зависимость между показателем оптической плотности и мигрирующими  $S_a$  ( $x_1$ ) и  $BOB$  ( $x_2$ ) в варианте, мелиорированном по 0.9  $H_r$ , описывается уравнением (3):

$$y_3 = 1.348 + 0.075x_1 - 0.03x_2 \quad (3)$$

Модель (3) статистически значима на очень высоком уровне значимости 2.9%. Величина  $F$ -статистики = 4.895. При этом  $F(0.971, 2.12) = 4.825$ . Все коэффициенты модели статистически значимы. График модели приведен на рис. 2а.

Таким образом, показатель  $E_c^{mg/ml}$  растворов достоверно статистически связан на высоком уровне значимости с мигрирующим  $BOB$  и удаляемым  $S_a$ , при этом коэффициент детерминации модели (3) не высок ( $R^2 = 0.45$ ). Модель (3) отражает общий характер изменчивости оптической плотности при варьировании содержания  $S_a$  и  $BOB$  в растворах. Учитывая знаки коэффициентов модели (3), можно заключить, что увеличение концентрации  $S_a$  и снижение содержания  $BOB$  в мигрирующих растворах вызывает рост показателя их оптической плотности.

Регрессионная зависимость между показателем оптической плотности ( $y_4$ ) растворов в опыте с почвой, мелиорированной по 2.5  $H_r$ , и концентрацией  $S_a$  ( $x_1$ ) и  $BOB$  ( $x_2$ ) в составе элюатов, описывается уравнением

$$y_4 = 1.344 - 0.126x_1 + 0.06x_2 \quad (4)$$

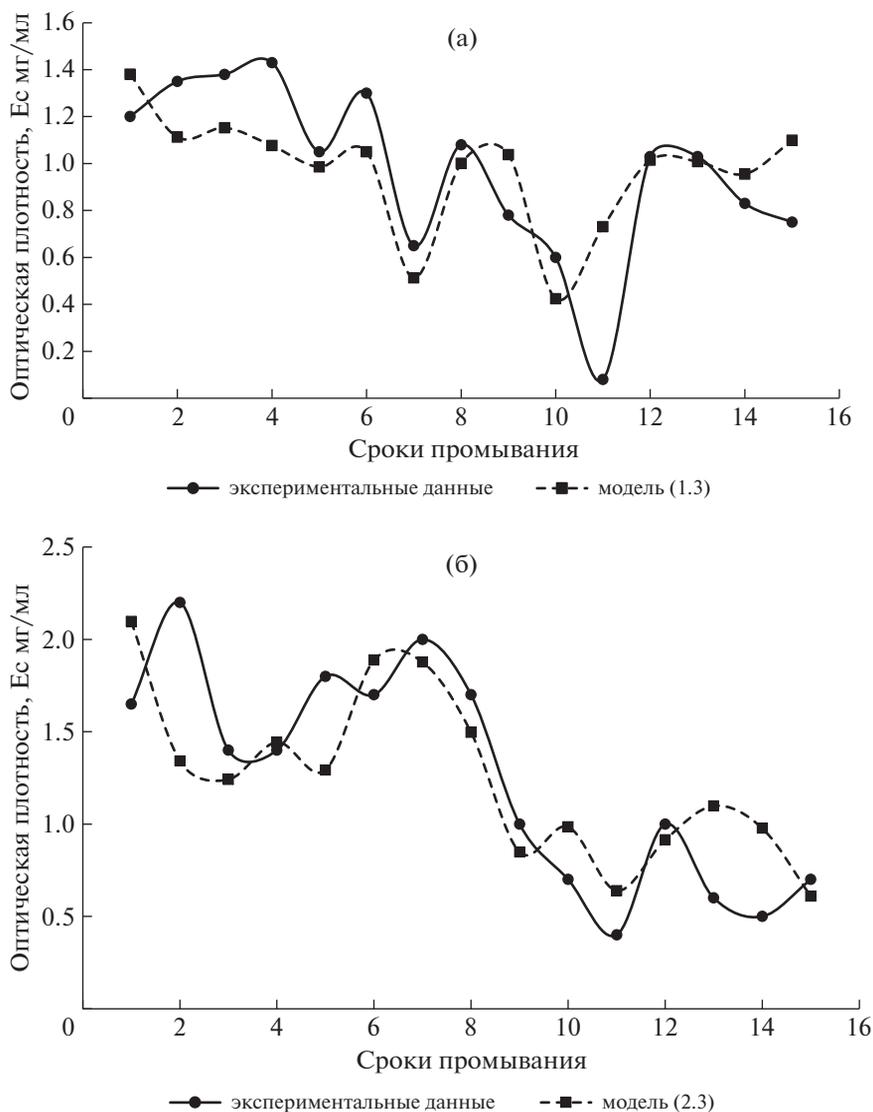


Рис. 2. Зависимость оптической плотности растворов, мигрирующих в почве, известкованной дозами мела  $0.9 H_T$  (а),  $2.5 H_T$  (б), от содержания в них *BOB* и *Ca*.

Модель (4) статистически значима на очень высоком уровне значимости 0.5%, величина  $F$ -статистики = 8.696. При этом  $F(0.995, 2.12) = 8.51$ . Все коэффициенты модели статистически значимы. График модели приведен на рис. 2б.

Таким образом, оптическая плотность мигрирующих растворов достоверно статистически связана на высоком уровне значимости с мигрирующими *OB* и *Ca*. Коэффициент детерминации модели (4) не высок ( $R^2 = 0.59$ ). Модель отражает общий характер изменчивости показателя  $E_s^{mg/ml}$  при варьировании концентраций *Ca* и *BOB* в элюатах. Учитывая знаки коэффициентов модели (4), можно сделать заключение, что увеличение содержания, мигрирующего *Ca* при одновремен-

ном уменьшении содержания *BOB* в растворах, приводит к снижению их оптической плотности. Таким образом, при известковании завышенной дозой мела характер зависимости оптической плотности мигрирующих растворов от концентрации в них *Ca* и содержания *OB*, по сравнению с вариантом опыта с применением научно обоснованной дозы мела, меняется.

Проведенное исследование показало, на сколько по-разному происходит формирование состава органо-минеральных комплексов, мигрирующих в мелиорированных почвах при разных дозах применения мела.

Значительный интерес представляет состав элюатов первого промывания почвы с использо-

ванием мела в дозе  $2.5 H_r$ , исключенной при построении модели. Исследование показало, что в составе ОМК, мигрирующих на начальном этапе наблюдений и выпавших в осадок при доведении рН раствора до 13.0, содержание  $C_{орг}$  составляло 5.5%. Оптическая плотность раствора была равна 3 ед., что соответствовало оптической плотности ФК. Количество кальция, мигрирующего в составе ОМК, было равно 118 мг/кг.

Содержание  $C_{орг}$  в надосадочной жидкости составляло 75.5 мг/л, а концентрация Са – 920 мг/л. Оптическая плотность отстоявшейся над осадком жидкости была равна  $E_c^{мг/мл} = 1.2$  ед. Это соответствовало величине  $E_c^{мг/мл}$  ФК, но оказалось значительно меньше, чем оптическая плотность ОМК, выпадающих в осадок при доведении элюата до рН 13.0. Следовательно, не все ОМК, мигрирующие в мелиорируемых почвах способны осаждаться в условиях сильнощелочной реакции. Это не противоречит данным работы [14], где показано, что к осаждению при щелочной реакции способны только ФК, насыщенные кальцием.

В целом мигрирующие Са-органические соединения в мелиорированных почвах отличаются большой неоднородностью по качественному составу и свойствам. Насыщенные кальцием ОМК обладают повышенной оптической плотностью и способны выпадать в осадок при подщелачивании. Оптически менее плотные органические вещества, связанные с кальцием, не способны выпадать в осадок и остаются в растворе. Установление количества и соотношения ФК, способных к осаждению при щелочной реакции и остающихся в растворе мелиорированных почв, требует постановки специальных опытов.

## ВЫВОДЫ

1. За 16 промываний почвы, известкованной дозой мела, соответствующей  $0.9 H_r$ , было удалено 133 мг Са и 469 мг  $C_{орг}$ , из почвы, мелиорированной заведомо завышенной дозой мела ( $2.5 H_r$ ), – 637 и 510 мг соответственно. Увеличение дозы мела в 2.7 раза привело к усилению миграции Са в 4.8,  $C_{орг}$  – в 1.2 раза.

2. Вне зависимости от варианта опыта установлено наличие очень сильной статистической взаимосвязи между количествами мигрирующего кальция и  $C_{орг}$ . Усиление миграции Са в варианте с использованием заведомо завышенной дозы мела на элюирование *ВОВ* проявлялось сильнее.

3. Оптическая плотность растворов, мигрирующих в почве, известкованной научно обоснованной дозой мела, во всем промежутке времени

изучения, укладывалась в диапазон величин от 1.43 до 0.60, в почве, мелиорированной дозой мела, равной  $2.5 H_r$ , – от 2.0 до 0.4 ед.

4. Органо-минеральные комплексы, мигрирующие в мелиорированной дерново-подзолистой супесчаной почве, были неоднородными по составу и оптической плотности. Наиболее гумифицированная часть, насыщенная кальцием, способна выпадать в осадок при доведении раствора до рН 13.0. Низкомолекулярные ОМК и менее гумифицированные ФК остались в растворе.

5. Оптическая плотность удаляемых при промывании растворов достоверно статистически связана на высоком уровне значимости с мигрирующими *ОВ* и кальцием. В варианте, мелиорированном дозой мела  $0.9 H_r$ , увеличение содержания кальция в дренирующих водах и снижение в них количества  $C_{орг}$  вызывало рост показателя оптической плотности растворов. В варианте с использованием дозы мела  $2.5 H_r$  увеличение содержания кальция и снижение количества  $C_{орг}$  в растворах сопровождалось снижением их оптической плотности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Роде А.А.* Водный режим и влагообеспечивающая способность почв // Почвоведение. 1965. № 1. С. 49–55.
2. *Пестряков В.К.* Окультуривание почв Северо-Запада. Л.: Колос, 1977. 273 с.
3. *Литвинович А.В., Небольсина З.П.* Продолжительность действия мелиорантов в почвах и эффективность известкования // Агрохимия. 2012. № 10. С. 79–94.
4. *Яковлева Л.В.* Миграция оснований в дерново-подзолистых почвах Северо-Запада России. СПб., 2012. 106 с.
5. *Аканова Н.И., Шильников И.А., Ефремова С.Ю., Аваков М.С.* Значение химической мелиорации в земледелии и потери кальция и магния из почвы // Пробл. агрохим. и экол. 2017. Вып. 1. С. 28–35.
6. *Горбунов Н.И., Юдина Л.Н., Зарубина Т.Г.* Скорость нейтрализации кислот известью // Почвоведение. 1981. № 1. С. 150–156.
7. *Бакина Л.Г.* Роль фракций гумусовых веществ в почвенно-экологических процессах: Дис. ... д-ра биол. наук. СПб., 2012. 399 с.
8. *Kalbitz K., Kaiser K.* Contribution of dissolved organic matter to carbon storage in forest mineral soils // J. Plant Nutr. Soil Sci. 2008. V. 171. № 1. P. 52–60.
9. *Кауричев И.С., Ноздрунова Е.М.* Условия образования и масштабы миграции органо-минеральных соединений в почвах таежно-лесной зоны. Изв. ТСХА. Вып. 3. 1969. С. 103–110.
10. *Фокин А.Д., Аргунова В.А., Кауричев И.С., Яшин И.М.* Состав органического вещества, состояние полу-

- торных окислов и фосфатов в водах, дренирующих подзолистые почвы // Изв. ТСХА. 1973. Вып. 2. С. 99–105.
11. Яшин И.М., Карпунин А.И., Платонов И.Г., Черников В.А. Статика сорбции водных растворов фульвокислот доломитизированным известняком // Изв. ТСХА. 1991. Вып. 4. С. 17–31.
  12. Яшин И.М. Взаимодействие гидроксида железа, препаратов гуминовых кислот и доломита с водорастворимыми органическими веществами подзолистых почв // Изв. ТСХА. Вып. 5. 1991. С. 46–61.
  13. Литвинович А.В., Бакина Л.Г., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В. Устойчивость органического вещества и кальция к вымывающему действию воды // Агрохимия. 2017. № 3. С. 58–68.
  14. Пономарева В.В. О реакции взаимодействия группы креновой и апокреновой кислот (фульвокислот) с гидроокисями оснований // Почвоведение. 1949. № 11. С. 638–651.
  15. Шильников И.А., Лебедева Л.А. Известкование почв. М.: Агропромиздат, 1987. 179 с.
  16. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю. Моделирование процессов вымывания кальция и стронция из дерново-подзолистой супесчаной почвы, мелиорированной конверсионным мелом // Агрохимия. 2017. № 2. С. 48–55.
  17. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю. Интенсивность миграции кальция из дерново-подзолистой супесчаной почвы, известкованной различными дозами мелиоранта (по данным модельного опыта) // Агрохимия. 2015. № 6. С. 84–89.
  18. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М. Потери Са, Mg, К, Na, Fe и F из орошаемой лугово-сероземной почвы в результате миграции. Эмпирические модели процесса элювирования (по данным лабораторного опыта) // Агрохимия. 2020. № 1. С. 59–70.
  19. Литвинович А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В. Миграция водорастворимых органических веществ из дерново-подзолистой супесчаной почвы, известкованной различными дозами мелиоранта // Агрохимия. 2015. № 9. С. 67–74.
  20. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Маслова А.И. Динамика почвенной кислотности и содержание подвижных форм соединений алюминия, марганца и железа в почвах при известковании конверсионным мелом // Агрохимия. 2000. № 6. С. 23–27.
  21. 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. 1138–1150.
  22. Лаврищев А.В., Литвинович А.В. Стабильный стронций в агроэкосистемах. СПб.: Лань, 2019. 192 с.
  23. Литвинович А.В. Изменение величины почвенной кислотности в процессе взаимодействия мелиорантов с почвами (по данным лабораторных и вегетационного опытов) // Агрохимия. 2010. № 10. С. 3–10.
  24. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В. Миграция фтора в почвах различных природно-климатических областей // Агрохимия. 1999. № 6. С. 74–81.
  25. Плотникова Т.А., Пономарева В.В. Упрощенный вариант метода определения оптической плотности гумусовых веществ с одним светофильтром // Почвоведение. 1967. № 7. С. 73–85.
  26. Буре В.М. Методология статистического анализа опытных данных. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. 141 с.
  27. Карпунин А.И., Фокин А.Д. Фракционный состав фульвокислот некоторых типов почв // Изв. ТСХА. Вып. 3. 1971. С. 126–130.
  28. Кауричев И.С., Ноздрунова Е.П., Евсеева Р.П. О содержании и формах водорастворимых соединений алюминия в почвенных растворах // Почвоведение. 1969. № 9. С. 68–78.
  29. Пономарева В.В., Рагим-Заде А.Н. Сравнительное изучение фульвокислот и гуминовых кислот, как агентов разложения силикатных минералов // Почвоведение. 1969. № 3. С. 26–36.
  30. Фокин А.Д., Аргунова В.А., Кауричев И.С., Яшин И.М. Состав органического вещества, состояние полуторных окислов и фосфатов в водах, дренирующих подзолистые почвы // Изв. ТСХА. 1973. Вып. 2. С. 99–105.

## Migration Mobility of Organic Matter and Ca in Sod-Podzolic Sandy Loam Soil Produced by Different Doses of Chalk

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

#E-mail: avlavr@rambler.ru

In the model experiment on columns, the coupled study of migration mobility of water-soluble organic substances (*WSOS*) and calcium in sod-podzolic light-loam soil reclaimed by scientifically justified ( $0.9 H_a$ ) and overestimated ( $2.5 H_a$ ) doses of chalk was carried out. During 16 washings of the soil produced with a dose of

0.9  $H_a$  chalk, 133 mg of Ca and 469 mg of sorghum were removed from the soil reclaimed with a dose of 2.5  $H_a$  chalk – 637 and 510 mg, respectively. An increase in the dose of chalk by 2.7 times led to increased migration of calcium by 4.8, *WSOS* – by 1.2 times. Increased migration of calcium affected the eluviation of *WSOS* in the variant with the use of a dose of chalk equal to 2.5  $H_a$ , compared to the variant with a scientifically justified dose of chalk and was more pronounced. The coefficients of determination were equal to  $R^2 = 0.81$  and  $R^2 = 0.41$ , respectively. During the entire period of study in the soil of the experiment variant using chalk at a dose of 0.9  $H_a$ , changes in the optical density of the *WSOS* solution ranged from 1.43 to 0.6, in the variant with a dose of 2.5  $H_a$  – from 2.0 to 0.4 units. The optical density of migrating solutions was significantly statistically related to the migrating *WSOS* and Ca at a high level of significance. In the variant reclaimed with a 0.9  $H_a$  chalk dose, an increase in the calcium content in draining waters and a decrease in the amount of sorghum in them caused an increase in the optical density of solutions. In the variant with a dose of chalk equal to 2.5  $H_a$ , an increase in the calcium content and a decrease in the amount of *WSOS* in solutions were accompanied by a decrease in their optical density.

*Key words:* liming, calcium, water-soluble organic substances, migration, mathematical models.

УДК 631.417:631.445:504.54

## МИГРАЦИОННЫЕ ПОТОКИ, БАЛАНС И ФУНКЦИИ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ В ПОЧВАХ ТАЕЖНЫХ ЭКОСИСТЕМ<sup>1</sup>

© 2020 г. И. М. Яшин<sup>1</sup>, В. А. Черников<sup>1</sup>, С. Л. Белопухов<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева  
127550 Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

\*E-mail: belopuhov@mail.ru

Поступила в редакцию 22.11.2019 г.

После доработки 15.12.2019 г.

Принята к публикации 10.04.2020 г.

С помощью методов радиоактивных индикаторов и сорбционных лизиметров на стационарах изучены мобилизация, биодegradация, баланс и функции водорастворимых органических веществ (ВОВ) в подзолистых почвах южной (Подмосковье) и средней (Архангельская обл.) тайги. Обоснован один из возможных механизмов, а также скорость эмиссии газов (в частности, CO<sub>2</sub>) из подзолистых почв при трансформации ВОВ группами микроорганизмов. В полевых опытах установлено, что наибольшая скорость эмиссии CO<sub>2</sub> из новообразованных масс ВОВ происходила в пахотных почвах в сравнении с лесными аналогами, в которых эта величина составила 30.4 мг CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>/сут. Оглеение почв заметно затормаживало трансформацию молекул ВОВ до конечных продуктов биодegradации; при этом формировались так называемые “промежуточные” органические вещества с аллелопатическими свойствами. При переувлажнении почв, наряду с CO<sub>2</sub>, образуются газы с восстановительными функциями (H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>).

**Ключевые слова:** эмиссия CO<sub>2</sub>, водорастворимые органические вещества, источники диоксида углерода, фотосинтез (темновая и световая фазы), таежные экосистемы, почвы, гумусообразование.

DOI: 10.31857/S0002188120070108

### ВВЕДЕНИЕ

Компоненты водорастворимых органических веществ (ВОВ) почв давно привлекают внимание экологов, физиологов растений, почвоведов, микробиологов [1–10]. Это обусловлено их уникальными коллоидно-химическими свойствами и экологическими функциями [7, 11–14]. Большой вклад в исследование природы ВОВ, их состава, водной миграции и активного участия в глее- и подзолообразовании сыграли фундаментальные работы почвоведов Тимирязевской академии – В.Р. Вильямса, С.П. Яркова, И.С. Кауричева, А.Д. Фокина, С.Н. Алешина, А.И. Карпухина, В.И. Савича.

В таежных экосистемах компоненты ВОВ интенсивно мобилизуются в жидкую фазу почв из опада и лесных подстилок, корневых выделений и смывов с вегетативных органов растений. Заметный вклад в баланс ВОВ вносят и плесневые грибы-кислотообразователи в лесных подстилках

[2, 3, 15]. В этой связи исследование веществ почвенных растворов становится весьма актуальным. Неслучайно Докучаевское общество почвоведов России периодически проводит совещания и научные конференции по лизиметрии [3, 12, 16]. В этом направлении следует отметить инновационные технологии немецких специалистов [10, 17], которые добились значительных успехов при сопряженном изучении состава и свойств веществ лизиметрических растворов, а также газовой фазы почв и экосистем. На лизиметрической станции они используют лизиметры-монолиты шахтного типа, совмещенные с инновационными газоанализаторами типа “Лайкор”; полученная информация о составе веществ жидкой и газовой фаз выводится в павильон с компьютерами [17].

Одним из перспективных направлений в лизиметрии является разработка и применение метода сорбционных лизиметров (МСЛ) [14, 18]. Данный метод позволяет изучать процессы трансформации и водной миграции веществ в почвах реальных экосистем, с его помощью можно установить формы и масштаб миграции ионов метал-

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 02-04-48791.

лов в зависимости от почвенно-геохимических условий ландшафта, а также исследовать динамику продуктов почвообразования. МСЛ отличаются маневренностью и технологической простотой, поэтому данный метод позволяет организовывать стационарные наблюдения в различных географических зонах и в труднодоступных ландшафтах — дельтах и поймах рек, территориях после масштабных пожаров (гарях), на опытах селекционных станций и госсортоучастках, в горных экосистемах, в рисовых чеках, где стационарные лизиметры инженерного типа установить довольно проблематично [9].

Подчеркнем, изучение экологических функций компонентов *ВОВ* (газовой, миграционной, аллелопатической и др.) способствует более полному познанию таежных экосистем, например, выявлению адаптации биоты к суровым биоклиматическим условиям с помощью “биогенного кислотообразования” [1, 2, 19]. Появилась возможность оценки экологической взаимосвязи фотосинтеза в растениях и гумусообразования в почвах с помощью *ВОВ*. Это экосистемный уровень, а не уровень почвенного образца. Напомним, что экосистема, в отличие от почвы, обладает эмерджентностью.

Экосистемы способны сохранять и передавать информацию в пространстве—времени в виде структур органических и органо-минеральных веществ и их функций [15, 16, 20, 21]. В экосистемах упорядоченность структур биополимеров и гумуса поддерживается с помощью биогеохимических циклов миграции веществ и гумусообразования в почвах [14, 22]. Структурная упорядоченность гумусовых соединений (ГС), с одной стороны, отражает особенности функционирования живых организмов, а с другой — миграционные потоки органических соединений фотосинтетической природы в экосистемах. Структуры ГС развиваются (самоорганизуются) в условиях неравновесности экосистем — постоянного притока веществ и солнечной энергии. Часть веществ и энергии в химических связях *ВОВ* покидает экосистемы. Эти особенности и обуславливают флуктуации состава и свойств ГС вблизи квазистационарного состояния многофазной почвенной системы, а также формирование диссипативных структур (соединений переменного состава) [1, 6]. Как только прекращается внешний приток веществ и энергии, например, в почву (а в отношении ГС — это водорастворимые органические вещества), например, из-за распашки целинных степных почв или вырубки лесов в зоне тайги, так и начинается постепенное разрушение структур ГС [8, 13, 14, 22]. Становится понятной важность

и актуальность исследования миграционных потоков, баланса и функций *ВОВ* в экосистемах.

Цель работы — исследование миграционных потоков, баланса и функций водорастворимых органических веществ в почвах таежных экосистем.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования были почвы и экосистемы средней тайги стационара “Вилегодский” Архангельской обл. и южной тайги — в Подмосковье [14]. Использованы метод радиоактивных индикаторов (изотоп  $^{14}\text{C}$ ) и сорбционных лизиметров [22]. Аналитическая схема W. Forsyth в модификации И.М. Яшина позволила путем сорбции *ВОВ* активированным углем “карболен” в сорбционных колонках (в полевых опытах) определить состав *ВОВ*, их свойства и функции [8, 9, 14, 18, 23].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Получена новая информация о скорости и продуктах трансформации растительных остатков (*ВОВ*), тотально меченных радиоактивным изотопом  $^{14}\text{C}$ , на поверхности почв [14, 18] (табл. 1). Установлено, что на начальном этапе превращения растительного опада в поверхностных слоях почв на стационаре в Подмосковье формировались преимущественно индивидуальные (неспецифические) органические вещества, десорбируемые из активированного угля колонок 90%-ным ацетоном и водой. Доля фульвокислот (ФК) в среднем достигала 30% в составе *ВОВ*. По молекулярно-массовому (ММ) составу новообразованные компоненты *ВОВ* имели низкомолекулярный состав: среди индивидуальной группы органических веществ на долю *ВОВ* с  $\text{ММ} \leq 1000$  а.е.м. приходилось 94.1%, среди ФК — 84.7% [1, 7, 12, 24].

Сопряженное использование методов адсорбционной хроматографии на активированном угле (в колонках, установленных в почве) и гелевой фильтрации на сефадексах (важно использовать системную гель-хроматографию с гелями G-10, G-25, G-50, а не одну марку гелей декстрана), в едином варианте опыта обеспечивало концентрирование новообразованных масс *ВОВ* в сорбционных лизиметрах и последующее (лабораторное) выделение групп *ВОВ* с диагностикой их молекулярно-массового состава и свойств [1, 6, 7, 13, 24]. Заметное разнообразие органических лигандов и их производных, входящих в молекулярные структуры *ВОВ*, определяло неоднородность

**Таблица 1.** Распределение радиоактивного изотопа  $^{14}\text{C}$  по новообразованным группам *ВОВ* из растительных остатков ячменя, локализованных в сорбционных лизиметрах, и установленных в верхних слоях почв (стационар “Михайловский” Московская обл., экспозиция – 1 год), % суммарной активности *ВОВ*

Номера сорбционных колонок	Относительная активность групп <i>ВОВ</i> в элюатах из активированного угля колонок		Суммарная активность <i>ВОВ</i> по $^{14}\text{C}$ , %	Активность жидких новообразованных продуктов ( <i>ВОВ</i> ), % исходной активности $^{14}\text{C}$
	водо-ацетоновый	водо-аммиачный		
1	75.8 ± 1.5	24.2 ± 0.4	100	1.81 ± 0.1
2	80.0 ± 1.7	20.0 ± 0.3	100	3.52 ± 0.2
3	65.7 ± 1.2	34.3 ± 0.6	100	3.29 ± 0.2
4	57.0 ± 0.9	43.0 ± 0.8	100	3.16 ± 0.3
$\bar{x}$	69.9	30.4	–	2.95
$\sigma$	10.3	8.95	–	0.77

Примечания. 1. Активность изотопа  $^{14}\text{C}$  в растворах и экстрактах с угля диагностировали жидкостно-сцинтилляционным методом на бета-спектрометре Rackbeta (модель 1219 фирмы LKB, Wallac, Финляндия) в сцинтиляторе марки ЖС-8 с предварительным эталонированием. Ошибка измерений не превышала 3% при доверительном интервале 99%. 2. Меченый углерод твердых проб (растительных остатков и сорбентов) определяли в гелевых сцинтилляторах марки ЖС-13н на приборе ПП-8 Волна с газоразрядным счетчиком Т-25-БФЛ. Ошибка измерений – <10% при доверительном интервале 99%.

**Таблица 2.** Формирование фульвокислот и внутрипочвенное превращение групп *ВОВ* в сильноподзолистой почве под 70–80-летней елью (стационар в учхозе РГАУ–МСХА “Михайловское”, экспозиция – 1 год, при десорбции *ВОВ* из угля использованы равные объемы элюентов)

Расстояние от ствола ели, горизонт и глубина установки колонок под ними, см			Объем воды в лизиметрах, л	Углерод <i>ВОВ</i> , мг/л			Вынос $\text{C}_{\text{орг}}$ <i>ВОВ</i> , г/м <sup>2</sup> /год		Сорбция и минерализация <i>ВОВ</i> горизонтами почвы	
				в приемнике вод	в водо-ацетоновом элюате из угля (ИОВ)	в аммонийном элюате из угля (ФК)	фактический	расчетный	г/м <sup>2</sup>	%
0.9 м	АО	2	1.85	3.6	226	41.2	75.5	103	–	–
1.3 м	АО	2	2.60	2.5	118	76.4	76.9	–	–	–
2.5 м	АО	2	2.00	2.4	61.7	41.2	29.2	–	–	–
Среднее			2.15 ± 0.7	2.8 ± 0.7	135 ± 84	52.9 ± 20.3	60.5 ± 27.1	103	–	–
0.9 м	А1	7	1.40	1.8	153	183	71.1	–	–	–
1.3 м	А1	9	1.30	4.5	26.5	52.3	16.3	–	–	–
Среднее			1.35	3.2	89.5	117	43.7	–	16.8	27.8
0.9 м	ЕL	28	0.24	6.1	200	176	13.8	–	–	–
1.3 м	ЕL	30	0.80	5.9	61.8	291	43.2	–	–	–
Среднее			0.52	6.0	131	234	28.5	–	15.2	25.1
Итого							28.5	–	32.0	52.9

Примечание. Расчетный вынос *ВОВ*: при запасе еловой подстилки 1.4 кг/м<sup>2</sup>, содержании в ней углерода органических веществ 0.56 кг/м<sup>2</sup> и величине  $k_{\text{моб}}$ , равной 12%, ожидается мобилизация в раствор 67.2 г *ВОВ*/м<sup>2</sup> в осеннее-ранневесенний период. Из массы опада 0.4 кг/м<sup>2</sup> будет дополнительно мобилизовано углерода *ВОВ* 19.2 г/м<sup>2</sup>, что составит 86.4 г С/м<sup>2</sup>. С учетом убыли опада и коэффициента мобилизации, равного 3%, в летний период из массы подстилки 1.4 кг/м<sup>2</sup> образуется углерода *ВОВ* 16.8 г/м<sup>2</sup>. За год масштаб мобилизации *ВОВ* из гор. АО сильноподзолистой почвы, сформированной под кроной ели, составит 103 г/м<sup>2</sup> (без учета количества *ВОВ* в составе атмосферных осадков, стекающих с вегетативных органов ели и корневых выделений).

их ММ состава, а также особенности коллоидных, аллелопатических и химических свойств. Это очень важно с экологической точки зрения [7, 13, 25].

Наряду с полевыми опытами, в которых была использована радиоактивная метка  $^{14}\text{C}$ , был изу-

чен состав *ВОВ* и масштаб их водной миграции (плотность потока миграции) с помощью метода сорбционных лизиметров. Сорбент – активированный уголь “карболен” (табл. 2).

Результаты полевых опытов по изучению водной миграции *ВОВ* на основе МСЛ согласуются с

**Таблица 3.** Баланс масс новообразованных *ВОВ* при трансформации тотально меченных изотопом  $^{14}\text{C}$  растительных остатков ячменя в глубоко подзолистых почвах средней тайги (стационар “Вилегодский” в Архангельской обл.) [14], % суммарной активности исходного органогенного субстрата, через 2 года наблюдений

Основные статьи баланса (по $^{14}\text{C}$ ), оценка биогеохимических процессов в таежной экосистеме	Лесные почвы		Пахотная почва автономная (плакор)
	Автономная (плакор)	Полугидроорфная (западина)	
1. Осталось в исходном растительном опаде – консервация растительного опада	16.1 ± 0.3	29.5 ± 0.9	5.8 ± 0.2
2. Поглощено корнями растений и мхами (включение в биогенный поток миграции)	0.9 ± 0.0	7.4 ± 0.6	0.1 ± 0.0
3. Включено в гумусовые соединения почвы в слое внесения радиоактивной метки (0–3 см) – обновление фульвокислот гумуса	5.8 ± 0.1	18.2 ± 0.4	4.1 ± 0.1
4. Биодеградация молекул <i>ВОВ</i> микроорганизмами до конечных продуктов и эмиссия $\text{CO}_2$	70.4 ± 4.6	32.4 ± 2.5	83.0 ± 4.1
5. Включено в водную миграцию компонентов <i>ВОВ</i> с потоком гравитационной влаги в профиле почвы (нижняя граница зоны миграции за 2 года – 39–44 см)	6.8 ± 0.2	12.5 ± 0.3	7.0 ± 0.2

Примечания. 1. Меченый радиоактивный углерод  $^{14}\text{C}$  твердых проб почвы и растений определяли в гелевых сцинтилляторах марки ЖС-13 н. 2. Степень радиоактивности субстратов измеряли на приборе ПП-8 (“Волна”) с газоразрядным счетчиком Т-25 БФЛ. Ошибка измерения не превышала 10% при доверительном интервале 99%. 3. В работе участвовали профессора А.И. Карпунин и И.Г. Платонов.

фактическими данными, полученными при использовании растительных остатков, меченных изотопом  $^{14}\text{C}$ . Установлено, в частности, что в составе *ВОВ*, мобилизованных в почвенный раствор из еловой подстилки, заметно преобладали органические вещества индивидуальной природы – алифатические кислоты, аминокислоты, полифенолы. Однако после водной миграции через органо-минеральный сорбционный барьер (гор. А1) в составе *ВОВ* почвенных растворов заметно увеличивалась концентрация ФК, которая с глубиной еще больше возрастала и становилась преобладающей в подзолистом горизонте. Формирование ФК, возможно, было связано с реакциями комплексообразования и гетерогенного катализа [1, 6, 7]. Напомним, что молекулы ФК – наиболее устойчивые к биодеградации микроорганизмами, а также химически активные и миграционно способные [1, 6, 26].

Статьи баланса *ВОВ*, изученные в одном из полевых опытов с помощью метода радиоактивных индикаторов (табл. 3), показали, что наиболее значимой из них в балансе *ВОВ* была их биодегградация микроорганизмами. Например, в автономных подзолистых почвах (на плакоре) эта величина составила  $70.4 \pm 4.6\%$  от суммарной активности *ВОВ*. В полугидроморфной лесной почве (подзолисто-глеевой) статьи баланса были менее контрастными, чем в автоморфных аналогах. Примечательно, что в нисходящую водную ми-

грацию включалось 6.8–12.5% новообразованных масс *ВОВ* с кислотными свойствами. Причем одной из особенностей конвективного переноса влаги было то, что при нисходящей миграции в поровое пространство верхних горизонтов засасываются молекулы  $\text{CO}_2$  из поверхностных слоев почвы. Газы не только сорбируются минералами почвы, но и органическими кислотами почвенных растворов, претерпевая трансформацию. Генезис газовой фазы почвы отражает особенности функционирования экосистемы, а не только почвенные процессы и деятельность микроорганизмов (“дыхание почвы”) [9, 17, 23].

На основе авторских экспериментальных данных была рассчитана скорость эмиссии  $\text{CO}_2$  в таежной (лесной) экосистеме на основе результатов опыта, обобщенных в табл. 1. Средняя величина масштаба мобилизации *ВОВ* составляла 2.95% (абсолютная величина) за 1 год, что было равно 29.5 г *ВОВ*/кг органогенного субстрата. При запасах лесной подстилки 2.5 кг/м<sup>2</sup> масштаб мобилизации  $\text{C}_{\text{орг}}$  *ВОВ* составил 73.8 г/м<sup>2</sup>/год. Масштаб биодегградации *ВОВ* достигал в лесной фации 70% в среднем за 2 года опыта (табл. 3). Следовательно, остались неутрализованными 22.2 г *ВОВ*/м<sup>2</sup> в течение опыта. Скорость эмиссии молекул  $\text{CO}_2$  при трансформации *ВОВ* в поверхностных слоях почвы составила 30.4 мг/м<sup>2</sup>/сут или 0.69 ммоль. Эта величина не является постоянной, поскольку

лесная экосистема функционирует в динамическом режиме фотосинтеза (в световой и темновой фазах [20]), сопряженно с процессами почвообразования – глее- и подзолообразованием, трансформацией *BOB*, их миграцией, накоплением лесных подстилок и “дыханием почвы”. Поскольку  $\text{CO}_2$  тяжелее воздуха, он скапливается вблизи поверхности почв (без учета антропогенных источников  $\text{CO}_2$ ). Оптимальная концентрация  $\text{CO}_2$  в воздухе составляет 330–420 ppm. Сопряженное изучение миграционных потоков *BOB* и  $\text{CO}_2$  в экосистемах заповедников позволяет получить фоновые данные о функционировании почв и экосистем. При этом в соответствии с динамикой трансформации растительных остатков и формированием групп *BOB* отмечают их сезонные флуктуации, связанные с активностью микроорганизмов [3, 4, 8, 23]. Эмиссия  $\text{CO}_2$  из почв в таежных экосистемах также имеет волновой характер. Поэтому следует не просто измерять концентрации  $\text{CO}_2$  в воздухе по сезонам года, а изучать динамику экосистемных и почвенных процессов на стационарах.

Почему уделено большое внимание компонентам *BOB* в почвах таежных экосистем? В работах [1, 6, 13] отмечено, что *BOB* играют важную роль при формировании и обновлении структур гумусовых соединений в почвах. При этом в почвах лесных (таежных) ландшафтов средней и северной тайги не отмечено формирование устойчивых и высокомолекулярных гуминовых соединений. В профиле подзолистых почв не образуется горизонт А1. Исследователи иногда не учитывают этот феномен, не обосновывают процессы гумификации и гумусообразования на экосистемном уровне. На наш взгляд, в почвах таежных экосистем для “сборки” высокомолекулярных структур ГК не только не хватает подходящего “сырья” (компоненты *BOB* имеют низкомолекулярный состав, слабо закрепляются почвенной матрицей и легко элюируются водой). Эти почвы имеют очень низкое содержание N и ионов  $\text{Ca}^{2+}$ , содержат в основном низкомолекулярные органические вещества с кислотными функциями, которые заметно не насыщены ионами металлов [2, 6, 12, 19].

Следовательно, направленность процессов гумусообразования в почвах тайги состоит не столько в образовании высокомолекулярных ГС, сколько в динамике взаимосвязанных процессов мобилизации, трансформации и водной миграции кислотных компонентов *BOB*, содержащих энергию в химических связях их молекул, а также элементы питания, доступные биоте [21, 22]. *BOB* принадлежит важная генетическая роль связую-

щего звена между биотой и почвой в биогеохимическом круговороте [3, 14].

Но компоненты *BOB* не только участвуют в формировании и обновлении системы гумусовых соединений почв [15, 16]. В условиях возросших антропогенных нагрузок на почвы и экосистемы *BOB* выступают своеобразной движущей силой, с помощью которой происходит самоочищение экосистем и почв в зоне тайги. Например, в лесопарковых ландшафтах г. Москвы (в почвах катены Лесной опытной дачи (ЛОД) РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева), испытывавших заметную антропогенную нагрузку, еще в 1992–1993 гг. была изучена водная миграция компонентов *BOB* с помощью их сорбции на оксиде алюминия ( $\text{Na}^+$ ) в колонках (табл. 4).

Установлено, что через 20 лет масштаб водной миграции *BOB* в почвах ЛОД стал значительно больше (табл. 5). Не исключено, что это было связано с возросшей антропогенной нагрузкой – частицами пыли, сажи, золы, в составе которых содержатся и тяжелые металлы (ТМ). Лесопарковые экосистемы ЛОД, находящиеся на территории столичного мегаполиса, реагируют на экотоксиканты путем усиления биогенной кислотности и водной миграции *BOB*. Например, в 1993 г. масштаб водной миграции *BOB* из горизонта лесной подстилки составил ( $\text{г C}_{\text{орг}}/\text{м}^2/\text{год}$ ): на плакоре –  $11.2 \pm 1.0$ , на склоне из того же горизонта –  $8.2 \pm 1.3$ , в нижней 1/3 склона холма –  $16.5 \pm 1.8$ . В современный период мобилизация *BOB* с кислотными свойствами из растительного опада и корневых выделений в фациях ЛОД выражена значительно более активно:  $38.6 \pm 4.7 \dots 55.9 \pm 6.7 \text{ г}/\text{м}^2/\text{год}$ . С помощью *BOB* происходит самоочищение почв от экотоксикантов, чему способствует также промывной водный режим и обильное снеготаяние. Не исключено, что ответная реакция таежной биоты (и микроорганизмов), например, на ионы ТМ связана не только с увеличением масштаба миграции *BOB* в фациях ЛОД, но и изменением их компонентного состава – появлением среди компонентов *BOB* антибиотиков, полифенолов и микотоксинов – супертоксикантов, опасных для животных и людей. Возможно, поэтому травянистый покров на ЛОД выражен фрагментарно, с весьма низким видовым разнообразием лесных трав. Хотя это может быть связано и с затенением почв.

Исследуя водную миграцию *BOB* в почвах катены ЛОД, отмечены высокая подвижность и химическая активность их компонентов (табл. 5). Наибольший масштаб миграции *BOB* выявлен в почве под посадкой дуба, поскольку фация дуба

**Таблица 4.** Масштаб вертикальной нисходящей миграции *ВОВ* в дерново-подзолах контактно-осветленных супесчаных на двучленных отложениях (Лесная опытная дача РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева, наблюдения 06.1992–06.1993 гг.)

Горизонт и глубина установки колонок, см	Общий углерод в почве, %	Вынос $S_{орг}$ <i>ВОВ</i> , г/м <sup>2</sup> /год		Сорбция и минерализация <i>ВОВ</i> в почве, %
		верхний слой оксида алюминия	нижний слой оксида алюминия	
Плакор холма, квартал 11, лиственница				
О, 2	Не определяли	7.4 ± 0.6	3.80 ± 1.4	Не определяли
A1/Eh, 22	3.9 ± 0.2	1.2 ± 0.7	0.40 ± 0.15	85.7
Egh, 34	0.7 ± 0.1	0.9 ± 0.5	0.60 ± 0.4	Не определяли
EL'g, 57	0.4 ± 0.1	0.2 ± 0.1	0.13 ± 0.3	
Подошва склона холма, квартал 11, дуб				
О, 3	Не определяли	11.8 ± 3.2	4.70 ± 0.4	Не определяли
A1/Eh, 24	4.4 ± 0.5	3.5 ± 1.4	2.20 ± 0.3	65.5
Egh, 32	0.9 ± 0.4	1.4 ± 0.6	1.10 ± 0.3	Не определяли
EL'g, 63	0.5 ± 0.3	0.6 ± 0.5	0.45 ± 0.1	
Середина склона холма, квартал 11, сосна				
О, 1	Не определяли	5.3 ± 2.0	2.90 ± 0.7	Не определяли
A <sub>1</sub> /Eh, 18	2.1 ± 0.9	3.8 ± 1.7	0.65 ± 0.4	45.1
Egh, 35	0.5 ± 0.4	2.6 ± 1.5	0.51 ± 0.2	Не определяли
EL'g, 70	0.2 ± 0.1	1.4 ± 0.9	0.32 ± 0.1	

Примечания. 1. В сорбционных лизиметрах использованы 2 слоя оксида алюминия. Повторность закладки колонок 3–4-кратная, указаны средние величины и  $\sigma$ ;  $S_{орг}$  определяли в средних пробах 3–5 г оксида алюминия по методу Тюриня. В работе участвовал дипломник В. Зотиков. 2. В 1992 г. сорбционные лизиметры помогали закладывать профессора И.Г. Платонов и Л.В. Мосина.

расположена в нижней 1/3 очень пологого склона увала. В профиле почвы фации дуба отмечены более мощные гор. A0 и A1, чем в других фациях. В то же время для гор. A1 почвы в фации лиственницы отмечена более активная сорбция и минерализация *ВОВ*, очевидно, вследствие лучшей аэрации гор. A1. В почвах фации сосны нисходящий (абиогенный) вынос *ВОВ* был очень активен по всему профилю, что связано с супесчано-легкосуглинистым гранулометрическим составом и трансформацией верхних горизонтов (70–80 см) почвы при ветровалах. Подчеркнем, что сложившиеся представления о доминирующей роли нисходящей водной миграции *ВОВ* в почвах таежной зоны нельзя признать корректными. На самом деле в почвах таежных экосистем отчетливо выражена пульсация восходяще-нисходящих миграционных потоков (табл. 5). Вынос веществ в значительной мере компенсируется их возвратом. Если бы в экосистемах тайги был ярко выражен только вертикальный нисходящий вектор миграции *ВОВ* и химических элементов, то почвы довольно быстро превратились в почвоподобные тела (неудоби), утратив свои важные геохимические функции, это явление не отмечали.

На основе полученных экспериментальных данных сформулированы механизмы образования ФК в почвах подзолистого типа тайги: ассоциативный, миграционный и комплексообразовательный. В первом случае при ассоциации молекул *ВОВ* в новые структуры ФК участие принимают, например, гидратированные ионы  $Fe^{3+}$ . Показано, что среди мобильных железобульватных комплексов диагностировано 53–67% ионов Fe(III), прочно связанных ФК. Искусственное введение в раствор низких концентраций шавелевой кислоты, наоборот, вызывает распад новообразованных ассоциатов ФК до низкомолекулярных мономеров *ВОВ* [14]. Реакции комплексообразования ФК и ионными формами Fe(III) наряду с перегруппировкой их молекулярных структур сопровождаются также рН-эффектом – некоторым подкислением почвенного раствора. Наличие значительных масс низкомолекулярных органических кислот в лесных подстилках тайги препятствует формированию высокомолекулярных гуминоподобных структур. Поэтому в лесных подзолистых почвах средней и северной тайги под лесной подстилкой не образу-

**Таблица 5.** Сезонный масштаб нисходящей миграции *ВОВ* и их состав в почвах Лесной опытной дачи РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева

Горизонт и глубина установки колонок, см	Объем воды в лизиметрах, л	$C_{орг} \text{ } ВОВ, \text{ мг/л}$			Вынос $C_{орг} \text{ } ВОВ, \text{ г/м}^2/\text{год}$	$C_{орг} \text{ } ИОВ$ в составе $ВОВ, \%$	Сорбция и минерализация $ВОВ$ гор. $A_1$ , % к приходу
		в приемниках вод	в водоацетонном элюате с угля (ИОВ)	в аммонийном элюате с угля (ФС)			
Под кроной дуба, квартал 13, разр. 47, дерново-подзолистая легкосуглинистая почва на морене, нижняя 1/3 склона, наблюдения – 1 год							
A0(O), 3	1.54	2.9	417 ± 57	95.8 ± 15	38.6 ± 5	81.3	–
A1, 14	1.15	6.3	74.2 ± 23	187 ± 26	19.7 ± 2	28.4	49.0
A1/ELh, 27	0.93	8.4	35.7 ± 13	217 ± 34	19.0 ± 2	14.1	3.6
Под кроной лиственницы, квартал 7, разр. 15Л, дерново-подзол. контактно-осветленный супесчаный на двухчленных отложениях, плакор, наблюдения – 1 год							
A0(O), 2	1.74	11.6	537 ± 109	205 ± 30	55.9 ± 7	72.4	–
A1/Eh, 15	1.43	8.8	204 ± 23	372 ± 34	43.4 ± 3	35.4	22.4
Ehg, 28	0.84	15.6	115 ± 19	227 ± 40	25.7 ± 2	33.6	40.8
Квартал 7, разр. 15Л, плакор, наблюдения в период вегетации с 05.06. по 21.09							
A0(O), 2	0.25	1.4	89.5 ± 6	137 ± 15	17.1 ± 2.1	39.5	–
A1/Ehg, 16	0.22	3.6	37.9 ± 2	88.2 ± 5	9.5 ± 1.9	30.1	44.4
Квартал 7, разр. 15Л, плакор, наблюдения в абиогенный период с 15.10 по 21.05							
A0(O), 2	1.22	4.8	314 ± 88	184 ± 54	37.5 ± 4	63.0	–
Ehg, 29	1.37	11.5	176 ± 30	220 ± 66	29.8 ± 3	44.5	20.5
Квартал 7, разр. 15Л, плакор, опыт по изучению восходящей миграции с 15.10 по 21.05							
Ehg, 28	–	–	74.2 ± 16	193 ± 27	20.1 ± 3	27.8	Возврат 53.6%

Примечание. Сорбция *ВОВ* почвой отражает соотношение их масс на входе и выходе из генетического горизонта при миграции; заметная масса *ВОВ* при этом биodeградирует. В этом случае реализуется понятие “градиент барьера” миграции.

ется гумусово-аккумулятивный горизонт. Вместо него присутствует подзолистый горизонт, пропитанный миграционными формами *ВОВ* и железо-органическими комплексными соединениями. Данный процесс имеет ярко выраженный сезонный цикл: весной подзолистый горизонт выражен наиболее типично, а летом – это ложный гумусовый слой, нередко ошибочно принимаемый за дерновый горизонт.

Миграционный механизм образования *ФК* был обнаружен и изучен при прохождении *ВОВ* в профиле ряда почвенно-геохимических барьеров миграции: сорбционного органогенного ( $O_T$ ), сорбционного органо-минерального ( $A_1$ ), элювиально-оглеенного ( $ELg$ ). В основе указанного механизма, очевидно, лежат сорбционно-каталитические реакции с минералами (и коллоидами) и комплексобразование. Наиболее значимы для таежной биоты те низкомолекулярные фракции *ФК*, которые не насыщены ионами металлов и являются активными природными реагентами (и

мигрантами). Им принадлежит своеобразная и важная роль в почвенно-геохимической миграции ионов *ТМ* в ландшафтах тайги, а также в модификации и стабилизации коллоидных систем *Si*, *Fe*, *AL*.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, установлено, что в транс-аккумулятивной фации Лесной опытной дачи (ЛОД) РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева (под кроной дуба) в годовом цикле миграции заметно выражена сорбция водорастворимых органических веществ (*ВОВ*) в горизонте  $A_1$ . В этом горизонте задерживается 49% мигрируемых масс *ВОВ*. Горизонт  $A_1/Eh$  является транзитным для *ВОВ* и сорбция почти не выражена.

На плакоре, под кроной лиственницы, в горизонте  $A_1/Eh$  отмечен аккумулятивно-элювиальный процесс: в этом случае закреплялось только 22.4% мигрирующих масс *ВОВ*, хотя в горизонте

$E_{hg}$  отмечена более масштабная сорбция *ВОВ*. В период вегетации водная миграция *ВОВ* в почвах ЛОД была выражена менее масштабно (из-за биодegradации *ВОВ* микроорганизмами), причем в составе *ВОВ* преобладали вещества фульвокислотной природы, более устойчивые к биодegradации.

С помощью методов радиоактивных индикаторов и сорбционных лизиметров исследованы миграционные потоки *ВОВ*, их статьи баланса и некоторые экологические функции. В почвах таежных экосистем установлена скорость эмиссии  $CO_2$  из почвы —  $30.4 \text{ мг/м}^2/\text{сут}$ . Оптимальная концентрация  $CO_2$  в воздухе составляла 330–420 ppm. Установлено, что углеродсодержащие вещества жидкой и газовой фаз таежных экосистем генетически взаимосвязаны, но их функции исследованы пока недостаточно.

Становление экологической парадигмы, основанной на познании нативных форм гумусовых веществ, было осуществлено при изучении почв и экосистем тайги. В этом случае процесс таежного гумусообразования связан с биогенным кислотообразованием при активном участии в нем микроскопических плесневых грибов — *Mucor*, *Penicillium*, *Aspergillus*. В экосистемах тайги формируются разнообразные по составу, структуре и свойствам *ВОВ*, как функция таежной биоты. Компоненты *ВОВ* отличаются химической активностью, кислотными и аллелопатическими свойствами, позволяя таежной биоте эффективно и устойчиво функционировать в суровых условиях климата, на бедных почвообразующих породах, при промывном водном режиме и оглеении почвенных горизонтов. *ВОВ* — доступный источник веществ и энергии для микроорганизмов. Используя компоненты *ВОВ*, микроорганизмы изменяют их состав и свойства — появляются новые устойчивые фракции органических веществ.

Выражаем благодарность за участие в полевых опытах профессору И.Г. Платонову и А.И. Карпухину, за методическую помощь в работе — профессору А.Д. Фокину, доценту А.С. Пельцеру и старшему научному сотруднику Е.И. Шестаковой.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпухин А.И., Яшин И.М., Черников В.А. Формирование и миграция комплексов водорастворимых органических веществ с ионами тяжелых металлов // Изв. ТСХА. 1993. Вып. 2. С. 107–126.
2. Мотузова Г.В., Зорина А.В., Степанова А.А. Водорастворимые органические вещества подстилок AL-Fe-гумусовых подзолов Кольского полуострова // Почвоведение. 2005. № 1. С. 65–73.
3. Кудеяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России М.: Наука, 2007. 315 с.
4. Рачинский В.В., Фокин А.Д., Талдыкин С.А. Исследование потоков почвенной влаги и миграции веществ в подзолистых почвах изотопно-индикаторным методом // Почвоведение. 1982. № 2. С. 67–73.
5. Тюрюканов А.Н., Федоров В.М., Тимофеев-Ресовский Н.В. Биосферные раздумья. М.: АЕН РФ, 1996. 368 с.
6. Фокин А.Д. Исследование процессов трансформации, взаимодействия и переноса органических веществ, Fe и фосфора в подзолистой почве: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М.: ТСХА, 1975. 28 с.
7. Яшин И.М., Кащенко В.С. Миграция водорастворимых органических соединений в супесчаных глееподзолистых почвах Севера Европейской части СССР // Изв. ТСХА. 1984. Вып. 6. С. 59–71.
8. Яшин И.М. Об эффекте “гумусовой занавески” в глее-подзолистых почвах северной тайги Архангельской области // Сб. тр. “Экология и почвы”. Избр. лекции. Пушино: ИФХ и БПП РАН, 2005. С. 319–330.
9. Яшин И.М. Мониторинг процессов миграции и трансформации веществ в почвах. М.: РГАУ–МСХА, 2013. 183 с.
10. Guggenberger G., Zech W. Dissolved organic carbon in forest floor Leachates: simple degradation products or humic substances? // Sci. Total Environ. 1994. V. 152. Iss. 1. P. 37–47.
11. Шамрикова Е.В. Кислотность почв таежной и тундровой зон Европейского Северо-Востока России. СПб.: Наука, 2013. 157 с.
12. Шишов Л.Л., Кауричев И.С., Большаков В.А., Яшин И.М. Лизиметры в почвенных исследованиях. Монография. М.: РАСХН, Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 1998. 264 с.
13. Яшин И.М., Черников В.А., Карпухин А.И. Содержание и состав водорастворимых органических веществ в поверхностных природных водах Европейского Севера // Изв. ТСХА. 1990. Вып. 3. С. 68–83.
14. Яшин И.М. Водорастворимые органические вещества почв таежной зоны и их экологические функции: Дис. ... д-ра биол. наук. М.: МСХА, 1993. 726 с.
15. Зубкова Т.А., Карпачевский Л.О. Матричная организация почв. М.: Русаки, 2001. 296 с.
16. Карпачевский Л.О., Яшин И.М. Предисловие к тез. докл. 1-й Всерос. конф. “Лизиметрические исследования почв” (6–10 июля 1998 г., Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова). М.: Изд-во МГУ, 1998. С. 8–12.
17. Umwelt-Gerate-Technik (Katalog): Lysimeterver-suche. Munchenberg, 2011. 209 s. (www.ugt-online.de)
18. Яшин И.М., Черников В.А. Опыт применения хроматографии в почвоведении и экологии. Монография / Под ред. Яшина И.М. М.: РГАУ–МСХА, 2017. 240 с.
19. Лукина Н.В., Никонов В.В. Кислотность подзолистых AL-Fe-гумусовых почв сосновых лесов в условиях аэротехногенного загрязнения // Почвоведение. 1997. № 7. С. 879–891.

20. Гудвин Т., Мерсер Э. Введение в биохимию растений. Уч. изд-е. Пер. с англ. / Под ред. Кретовича В.Л. М.: Мир, 1986. Т. 1 – 392 с., Т. 2 – 312 с.
21. Яшин И.М., Васенев И.И., Черников В.А. Экогеохимическая оценка почв заповедников Европейского Севера России. Монография / Под ред. Яшина И.М. М.: РГАУ–МСХА, 2019. 212 с.
22. Яшин И.М., Кауричев И.С., Черников В.А. Экологические аспекты гумусообразования // Изв. ТСХА. 1996. Вып. 2. С. 59–71.
23. Яшин И.М. Трансформация растительных остатков и формирование мобильных групп гумусовых веществ в почвах тайги // Сб. мат-лов Всерос. научн. конф. с международ. участием, посвящ. 110-летию со дня рожд. Р.В. Ковалева – первого директора ин-та ИПА СО РАН “Почвы Сибири: вызовы 21-го века”. Новосибирск, 15–17 сентября 2017. Новосибирск: ИПА СО РАН, 2017. С. 123–129.
24. Яшин И.М., Раскатов В.А., Шишов Л.Л. Водная миграция химических элементов в почвенном покрове. М.: МСХА, 2003. 316 с.
25. Яшин И.М. Методология и опыт исследования органических веществ лизиметрических (и природных) вод таежных ландшафтов // Мат-лы Междунаро. симп. “Методы исследования органического вещества почв”. Владимир: РАСХН, 2005. С. 481–487.
26. Кудярова А.Ю. Использование сорбционных лизиметров для изучения влияния фосфатов на перенос в почве металлов и органического углерода // 1-й Всерос. конф. “Лизиметрические исследования почв” (6–10 июля 1998 г., Москва, МГУ им. М. В. Ломоносова). М.: Изд-во МГУ, 1998. С. 101–104.
27. Yashin I.M. Migration of water-soluble organic substances as related to soil cover structure in taiga landscapes // Euras. Soil Sci. 2002. 35. P. 78–89.

## Migration Flows, Balance and Functions of Water-Soluble Organic Substances in Soils of Taiga Ecosystems

I. M. Yashin<sup>a</sup>, V. A. Chernikov<sup>a</sup>, and S. L. Belopukhov<sup>a,#</sup>

<sup>a</sup> Russian State Agrarian University–Moscow Timiryazev Agricultural Academy  
ul. Timiryazevskaya 49, Moscow 127550, Russia

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

Using the methods of radioactive indicators and sorption lysimeters in hospitals, the mobilization, biodegradation, balance and functions of water-soluble organic substances (*WOS*) in podzolic soils of the southern (Moscow region) and middle taiga Arkhangelsk region were studied. One of the possible mechanisms is substantiated, as well as the rate of gas emission (in particular, CO<sub>2</sub>) from podzolic soils during the transformation of the *WOS* by groups of microorganisms. In field experiments it was found that the highest rate of CO<sub>2</sub> emission from the newly formed *WOS* masses occurs in arable soils in comparison with forest analogues, in which this value is 30.4 mg/m<sup>2</sup> CO<sub>2</sub> per day. Soil gleying significantly inhibits the transformation of *WOS* molecules to the final products of biodegradation; in this case, the so-called “intermediate” organic substances with allelopathic properties are formed. With waterlogging of soils, along with CO<sub>2</sub>, gases are formed with reducing functions – H<sub>2</sub>S, CH<sub>4</sub>.

*Key words:* CO<sub>2</sub> emission, water-soluble organic substances, sources of carbon dioxide, photosynthesis (dark and light phases), taiga ecosystems, soils, humus formation.

УДК 631.878:631.416.1:631.445.24

## ВЛИЯНИЕ БИОУГЛЯ НА СОДЕРЖАНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ФОРМ АЗОТА В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ СУПЕСЧАНОЙ ПОЧВЕ С РАЗНОЙ СТЕПЕНЬЮ ОКУЛЬТУРЕННОСТИ

© 2020 г. Е. Я. Рижия<sup>1,\*</sup>, Н. П. Бучкина<sup>1</sup>, Е. В. Балашов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Агрофизический научно-исследовательский институт  
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия

\*E-mail: alenarizh@yahoo.com

Поступила в редакцию 11.12.2019 г.

После доработки 25.12.2019 г.

Принята к публикации 10.03.2020 г.

В 3-летнем вегетационно-полевом эксперименте оценили влияние древесного биоугля, внесенного в дозе 1% от массы средне- и высоко окультуренной дерново-подзолистой супесчаной почвы, на динамику содержания аммонийного и нитратного азота. В вегетационных сосудах, установленных в полевых условиях, исследование провели в вариантах: 1 – почва (контроль), 2 – почва с биоуглем, 3 – почва с нитроаммофоской и 4 – почва с совместным внесением биоугля и минерального удобрения. Результаты показали, что внесение биоугля не оказало влияния на содержание аммонийного азота в почве с разной степенью окультуренности, но достоверно увеличило содержание нитратного азота по сравнению с вариантами без биоугля.

*Ключевые слова:* аммонийный азот, нитратный азот, древесный биоуголь, дерново-подзолистая почва, степень окультуренности.

DOI: 10.31857/S0002188120060095

### ВВЕДЕНИЕ

Современный переход к адаптивной интенсификации растениеводства ориентирует на разработку и освоение инновационных технологий возделывания сельскохозяйственных культур [1]. В последнее десятилетие в сельском хозяйстве разных стран мира в качестве органического мелиоранта широко используют биоуголь – продукт высокотемпературной бескислородной карбонизации органических остатков в пиролизных печах [2]. По своему строению биоуголь относится к классу карбонизированных веществ из-за общности характерного структурного элемента – атомной сетки циклически полимеризованного углерода, валентно соединенного между собой. Каждая частица биоугля состоит из 2-х главных структурных фракций: сложенных кристаллических листов графена и аморфной ароматической структуры, расположенной в случайном порядке [3]. В структуру ароматических колец в качестве гетероатомов входят элементы Н, О, N, Р и S, что вносит большой вклад в химические свойства поверхности и реактивности биоугля [4].

Внесение биоугля в почву способно решить множество экологических задач – секвестрацию

углерода в почве на длительный срок, снижение эмиссии парниковых газов и улучшение почвенного плодородия [5–7]. Различные опыты с зерновыми, овощными и плодовыми культурами показали, что биоуголь улучшает гидрофизические свойства почв, стимулирует микробиологическую активность, снижает эмиссию парниковых газов и в целом положительно влияет на урожайность многих культур [8, 9]. Однако некоторые аспекты применения биоугля остаются противоречивыми, в частности, доступность растениям питательных элементов из почвы после его внесения. Показано, что образующиеся из лабильных азотсодержащих органических соединений доступные для растений формы азота в почве могут активно сорбироваться биоуглем, вследствие чего их количество в почве может уменьшаться [10]. Тем не менее, биоуголь, улучшая физические и физико-химические свойства почвы, оказывает положительное влияние на содержание углерода биомассы микроорганизмов, при уменьшении которого содержание аммония и нитратов в почве может возрасть [11]. Эти процессы, вероятно, идут одновременно и комплементарны, и от того, какой процесс преобладает, зависит эффективность действия биоугля на урожай культур. Кроме

**Таблица 1.** Сравнительная характеристика дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной степенью окультуренности (исходные данные на 2012 г.)

Степень окультуренности	$H$ , см	$HВ$ , %	$d_v$ , г/см <sup>3</sup>	$pH_{KCl}$	$C_{общ}$	$N_{общ}$	$N_{мин}$	$P_2O_5$	$K_2O$
Средняя	22	20	1.3	5.3	1.9	0.14	15.7	237	131
Высокая	30	24	1.1	5.8	2.3	0.18	47.7	515	275

Примечание.  $H$  – глубина пахотного горизонта,  $HВ$  – наименьшая влагоемкость почвы,  $d_v$  – плотность сложения почвы,  $pH_{KCl}$  – обменная кислотность,  $C_{общ}$  – общее содержание органического углерода,  $N_{общ}$  – общее содержание азота,  $N_{мин}$  – содержание минерального азота ( $N-NO_3 + N-NH_4$ ),  $P_2O_5$  – содержание обменного фосфора,  $K_2O$  – содержание обменного калия.

**Таблица 2.** Химическая характеристика древесного биоугля

$C_{общ}$ , %	$N_{общ}$ , %	$C : N$	$H$ , %	$H : C$	$O$ , %	$O : C$	$pH_{H_2O}$	$W$ , %	Зола, %	$S$ , м <sup>2</sup> /г	$P$ , %
78.6	0.3	302	5.2	0.06	4.2	0.05	7.0	3.92	21.4	16.2	81

Примечание.  $C_{общ}$  – содержание общего органического углерода,  $N_{общ}$  – содержание общего азота,  $H$  – содержание водорода,  $O$  – содержание кислорода,  $S$  – удельная поверхность,  $P$  – пористость биоугля.

того, используя биоуголь в сельском хозяйстве, необходимо учитывать состав исходной биомассы, из которой производят карбонизированный продукт, потому что различная температура и скорость пиролиза определяют его различные свойства: содержание  $CHNO$ ,  $pH$ , удельная поверхность, гидрофильность–гидрофобность, степень адсорбционной способности и т.п. [12, 13]. Следовательно, перспективы широкого применения различных биоуглей в разных типах почв остаются открытыми и требуют длительных исследований. Крупный и наиболее устойчивый биоуголь в нашей стране получают из древесных остатков, в то время как из растительных остатков, например, соломы злаковых, стеблей кукурузы, рисовой шелухи, виноградных, персиковых или яблочных жмыхов и косточек или скорлупы различных орехов и т.п. производят мелкий и менее устойчивый материал [14].

Цель работы – количественная оценка динамики содержания минеральных соединений азота в дерново-подзолистой супесчаной почве с разной окультуренностью после внесения древесного биоугля.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Вегетационно-полевой эксперимент провели на агрофизическом стационаре Меньковского филиала АФИ (Гатчинский р-н Ленинградской обл.) в течение вегетационных периодов 2012–2014 гг.

По двадцать 22-литровых вегетационных сосудов (высота – 40 см, площадь поверхности – 0.07 м<sup>2</sup>) без дна установили в средне- и высокоокультуренную дерново-подзолистую супесчаную почву (табл. 1). Разная степень окультуренности почвы

была достигнута внесением в 2003–2005 гг. разных доз навоза крупного рогатого скота, в совокупных дозах 220 т/га для среднеокультуренной почвы и 540 т/га – для высокоокультуренной почвы.

Основные объекты исследования – биоуголь, химическая характеристика которого представлена в табл. 2, дерново-подзолистая супесчаная почва и выращиваемые культуры. Кроме того, оценили целесообразность совместного внесения биоугля с нитроаммофоской (НАФК N16P16K16) из расчета N90, содержащей обе формы азота, главным образом потому, что в почве присутствует аммонийная и нитратная форма азота.

Биоуголь был получен быстрым бескислородным пиролизом (при температуре 550°C) из древесины ольхи, березы и осины. В почву внесли фракцию биоугля с диаметром 2–3 см.

Схема эксперимента включала следующие варианты для средне- и высокоокультуренной почв: 1 – контроль (**К**, почва без биоугля и азотного минерального удобрения), 2 – почва с биоуглем (**БУ**, 84.8 г/сосуд из расчета 12 т/га), 3 – почва с азотным удобрением (1.4 г НАФК/сосуд) и 4 – почва с биоуглем и НАФК (**БУ + НАФК**). Биоуголь и НАФК внесли в почву в 2012 г. и в последующие годы оценивали их последствие.

Выращиваемые культуры: 2012 г. – ячмень (*Hordeum vulgare* L.) сорта Ленинградский с подсевом многолетних трав (*Phleum pratense* L. и *Trifolium pratense* L.), 2013 г. – многолетние травы 1-го года пользования, 2014 г. – многолетние травы 2-го года пользования. Повторность эксперимента пятикратная.

Метеорологические данные за вегетационные периоды 2012–2014 гг. предоставлены Меньков-

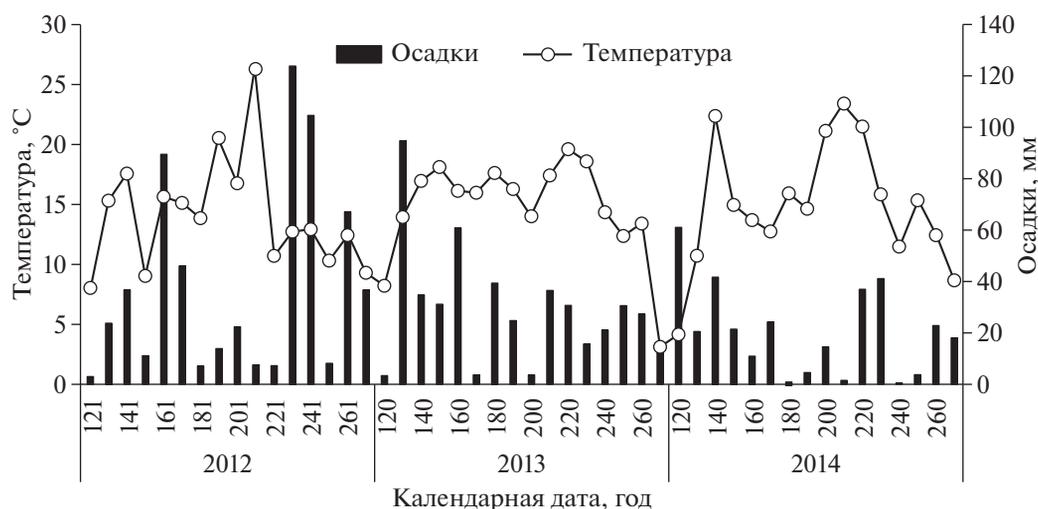


Рис. 1. Динамика температуры воздуха и количества осадков (по декадам месяцев) за вегетационные периоды 2012–2014 гг.

ской метеостанцией, расположенной в 200 м от объекта исследований (рис. 1). За вегетационный период 2012 г. (май–сентябрь) выпало 590 мм осадков, средняя температура воздуха составила 14.1°C. Согласно среднестатистическим метеоданным по Ленинградской обл., вегетационный период относится к влажному (преобладание пасмурной погоды и превышение нормы осадков в каждом вегетационном месяце) и прохладному периоду. В 2013 г. вегетационный период являлся умеренно-влажным (близким к климатической норме) и теплым (470 мм осадков и 15.8°C – средняя температура воздуха). Третий вегетационный период эксперимента был засушливым (из-за отсутствия осадков в июле) и теплым (333 мм и 14.9°C). Волны холода и тепла оказывали воздействие на поверхность почвы и в зависимости от температуры воздуха, их продолжительности, количества осадков проникали в нижележащие слои почвы и оказывали разное влияние на численность и активность микроорганизмов.

Отбор образцов почв выполняли каждые 10 сут в течение 3-х вегетационных периодов. Содержание аммонийного азота в образцах почв определяли колориметрическим методом в солевой вытяжке (1 н. раствор KCl), индофенольным методом (ГОСТ 26489-85), содержание нитратов – в виде окрашенного диазосоединения (ГОСТ 26488-85) на спектрофотометре Spectroflex 6100 (WTW, Германия).

Статистическую обработку результатов проводили с использованием пакета программ “Microsoft Excel”, вычисляя величины средних, стандартных отклонений, ошибки. Достоверность различий средних оценивали с помощью дисперсионного анализа (ANOVA) при  $p \leq 0.05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Важнейшими процессами внутрипочвенной трансформации азота являются аммонификация и нитрификация. Характер динамики содержания аммонийного азота ( $N-NH_4$ ) во время вегетационных периодов описывался классической кривой (рис. 1а, б). Максимум содержания  $N-NH_4$  наблюдали во всех вариантах средне- и высококультурной почвы в начале вегетационного периода. Уменьшение содержания аммонийного азота в почве выявлено в конце вегетационного периода. Наши данные согласовались с результатами многих исследований сезонной динамики содержания аммонийного азота [15, 16]. Относительное увеличение содержания аммонийного азота в почве в начале вегетационного периода вызвано возрастанием микробиологической активности после зимне-весеннего периода и с началом роста и развития корневых систем возделываемых культур. Уменьшение содержания аммонийного азота в почве обусловлено увеличением интенсивности нитрификации, возможной его ассимиляцией почвенной биотой и усилением его потребления растениями в период прироста биомассы. Кроме того, общая тенденция уменьшения содержания  $N-NH_4$  в середине вегетационного периода связана с изменением воздушного, теплового и водного режимов почвы, обусловленным засухами в июне и июле, что также оказало влияние на интенсивность микробиологических процессов аммонификации и нитрификации.

Результаты исследования контрольного варианта среднекультурной почвы показали (рис. 2а), что содержание  $N-NH_4$  варьировало в 2012 г. от 2 до 20 мг/кг, в 2013 и 2014 гг. – от 1.6 до 4.0 мг/кг.

В высокоокультуренной почве (рис. 2б) динамика данного показателя в контрольном варианте варьировала в 2012 г. от 5 до 24 мг/кг, в последующие годы – от 2 до 7 мг/кг.

Основные различия в содержании аммонийного азота в почвах контрольных вариантов обусловлены выращиванием различных сельскохозяйственных культур и разными погодными условиями в течение вегетационных периодов. Большое количество пожнивных остатков в верхнем слое почвы под клевером красным в 1-й и 2-й год пользования замедляло прогревание почвы и способствовало иммобилизации доступного азота микроорганизмами. Результаты метеорологических наблюдений (рис. 1) показали, что количество осадков в вегетационные периоды 2013 и 2014 гг. было существенно меньше, чем в первый год исследования. Многие исследования подтвердили снижение численности аммонифицирующих бактерий при снижении влажности почвы до 40% ПВ [17, 18].

Внесение в почву НАФК в 2012 г. привело к достоверному ( $p < 0.05$ ), почти 2-кратному увеличению содержания аммонийного азота как в среднеокультуренной, так и в высокоокультуренной почве по сравнению с контролем. Известно, что внесение минеральных удобрений приводит к прямому и косвенному влиянию на почвенные процессы, главным образом к усилению микробиологической активности, что проявляется в изменении концентрации доступных форм азота [19]. Максимальное содержание аммонийного азота в почве с НАФК в первый год исследования выявлено в первой декаде лета: от 20 до 41 мг/кг почвы и от 30 до 50 мг N-NH<sub>4</sub>/кг почвы соответственно для средне- и высокоокультуренной почвы. Как и в контрольном варианте, весной и осенью концентрация аммонийного азота в почвах с НАФК была больше по сравнению с показателями, установленными в середине вегетационного периода (июнь–июль). Значительное снижение содержания N-NH<sub>4</sub> во 2-м и 3-м году эксперимента обусловлено прекращением внесения НАФК ввиду того, что выращивали травы 1-го и 2-го года, представленные клевером красным и тимофеевкой луговой. Клевер имеет слабую потребность в дополнительных азотных удобрениях и является прекрасным азотфиксатором, фиксирующим до 70% азота из атмосферы [20]. По мнению ученых [21, 22], в почвах с клевером отмечается тенденция к снижению содержания как аммонийного, так и нитратного азота. На создание и сохранение клубеньков клевер красный расходует немалое количество энергии. Поэтому при произрастании на богатых азотом почвах клевер красный не выдерживает конкуренции со сторо-

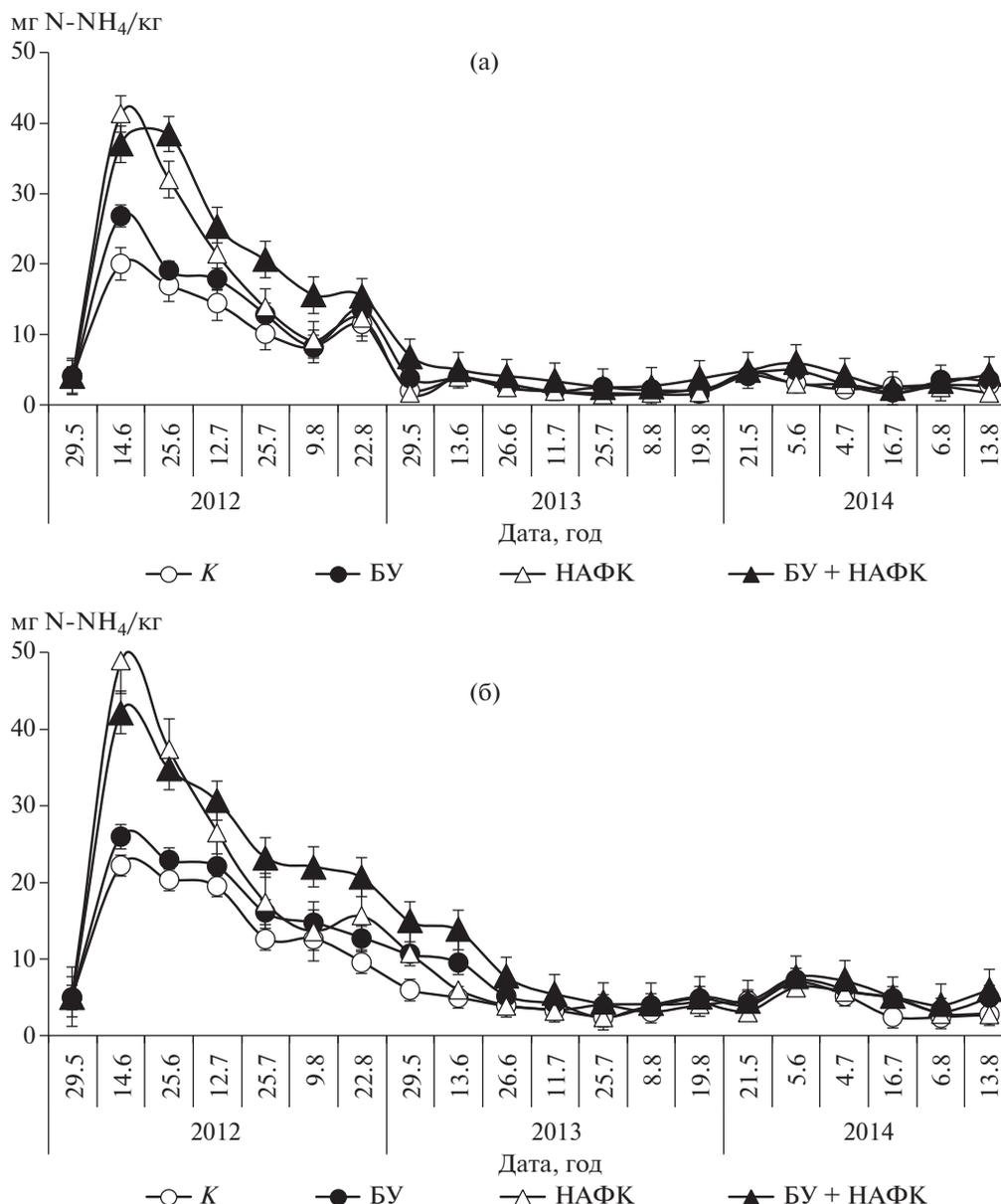
ны других растений, не вступающих в альянс с азотфиксаторами. Последствие НАФК в 2013 и 2014 гг. выразилось в сокращении содержания аммонийного азота в почве по сравнению с первым годом исследования. Концентрация N-NH<sub>4</sub> варьировала в течение данных вегетационных периодов от 1.5 до 7.2 мг/кг почвы с недостоверным ее преобладанием (на 7–12%) в высокоокультуренной почве по сравнению со среднеокультуренной почвой.

Внесение биоугля в среднеокультуренную почву (рис. 2а) как индивидуально, так и совместно с НАФК, недостоверно влияло на динамику содержания аммонийного азота в изученных вариантах по сравнению с вариантами без биоугля (контроль и НАФК соответственно). Содержание N-NH<sub>4</sub> в вариантах К и БУ, а также в вариантах НАФК и БУ + НАФК было практически одинаковым, но с трендом увеличения его содержания в почве вариантов с биоуглем на 6–10% в первый год исследования и с отсутствием этого тренда во 2-й и 3-й годы исследования.

Внесение биоугля индивидуально в высокоокультуренную почву (рис. 2б) привело к недостоверному увеличению содержания N-NH<sub>4</sub> на 8–12% в первый год исследования по сравнению с контролем. Совместное внесение биоугля с НАФК выразилось в незначительном снижении концентрации N-NH<sub>4</sub> на 5–9% с момента начала вегетации. Через 20 сут вегетации содержание аммонийного азота увеличилось на 12–15% по сравнению с вариантом с НАФК и оставалась на достигнутом уровне до конца вегетационного периода. В последующие периоды 2013 и 2014 гг. данный показатель оставался больше, чем в аналогичных вариантах без биоугля, но без достоверных различий между данными вариантами.

Отсутствие достоверного влияния биоугля на содержание аммония в изученных почвах согласовалось с результатами исследований других ученых [23, 24]. Изучая микробиологическую и ферментативную активность в почвах с биоуглем, отмечали увеличение биологической активности бактерий-аммонификаторов и гидроксилламин-редуктазы в почве в начале экспериментов и отсутствие различий между почвой в контрольном варианте и почвой с биоуглем в течение их дальнейшей динамики во время опыта.

Содержание нитратного азота в вариантах опыта в среднем за изученные вегетационные периоды достоверно ( $p < 0.05$ ), в 2.8 раза превосходило содержание аммонийного азота. Известно, что аммонийный азот не накапливается в заметных количествах в почве, т.к. потребляется растениями, микроорганизмами или подвергается дальнейшему превращению в почве [25]. Дина-



**Рис. 2.** Динамика содержания аммонийного азота в вариантах вегетационно-полевого опыта: (а) – среднекультуренная почва, (б) – высококультуренная почва, К – контроль, БУ – биоуголь, НАФК – нитроаммофоска, БУ + НАФК – совместное внесение биоугля и нитроаммофоски,  $n = 5$ . То же на рис. 3.

мика содержания нитратного азота в вариантах опыта представлена на рис. 3.

Результаты исследования контрольного варианта среднекультуренной почвы (рис. 3а) показали, что содержание  $N-NO_3$  варьировало в 2012 г. от 12 до 48 мг/кг, в 2013 и 2014 гг. – от 6 до 14 мг/кг. В высококультуренной почве в контроле (рис. 3б) содержание  $N-NO_3$  варьировало в 2012 г. от 16 до 51 мг/кг, в последующие годы – от 11 до 22 мг/кг. Характер динамики содержания нитратного азота как в среднекультуренной, так и в высококультуренной почве в течение первых 2-х лет

проявился в увеличении данного показателя от начала вегетационного периода к его середине, далее некоторым его снижением в середине вегетационного периода, связанного с активным увеличением биомассы корней выращиваемых культур, и его дальнейшим уменьшением к концу вегетационных периодов. В 3-й год эксперимента наблюдали повышение концентрации нитратного азота во всех вариантах опыта с середины лета к концу вегетационного сезона, что было связано с разложением пожнивных остатков и их запашкой под озимую пшеницу.

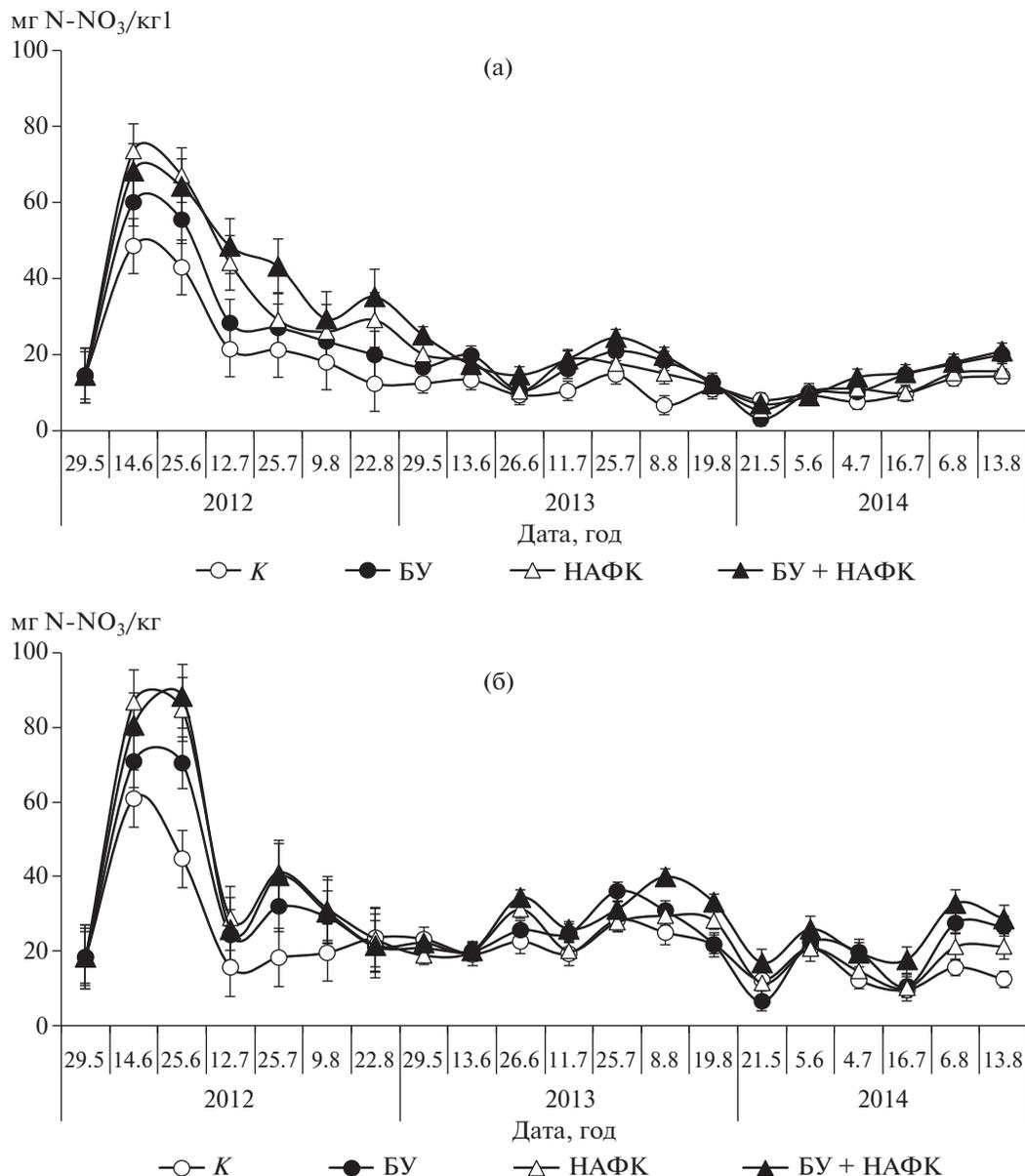


Рис. 3. Динамика содержания нитратного азота в вариантах вегетационно-полевого опыта в течение вегетационных периодов 2012–2014 гг.: (а) – среднеокультуренная почва, (б) – высоко окультуренная почва.

Внесение НАФК в первый год эксперимента привело к достоверному ( $p < 0.05$ ) увеличению содержания  $N-NO_3$  на 12–15% в среднеокультуренной почве и на 8–12% в высокоокультуренной почве по сравнению с контролем. Максимальное содержание  $N-NO_3$  в почве во всех вариантах эксперимента было отмечено в первой декаде лета, которое варьировало от 14.0 до 60.1 мг  $N-NO_3$  /кг в среднеокультуренной почве и от 18 до 86 мг  $N-NO_3$  /кг в высокоокультуренной почве.

В последующие годы, когда НАФК не вносили, содержание нитратного азота в почве всех вариантов опыта достоверно снизилось ( $p < 0.05$ ) по

сравнению с содержанием нитратного азота в почве вариантов в первый год исследования. Однако прослежено некоторое последствие минерального удобрения, которое выразилось в недостоверном увеличении содержания нитратного азота в почве по сравнению с контролем. На 3-й год исследования в почвах с разной окультуренностью между вариантом контроль и вариантом с минеральным удобрением существенных различий в содержании нитратного азота не отмечали.

Внесение биоугля в средне- и высокоокультуренную почву привело к достоверному ( $p < 0.05$ ) увеличению содержания нитратного азота в поч-

ве как по сравнению с контролем, так с вариантом с минеральным удобрением. В первый год исследования содержание нитратного азота в почве с биоуглем превысило его содержание в почве без биоугля в среднем в 1.3 раза. В течение данного вегетационного периода динамика содержания нитратного азота в среднеокультуренной почве варьировала от 14 до 60 мг/кг, в высокоокультуренной почве – от 25 до 70 мг/кг почвы. Наибольшее содержание нитратного азота выявлено при совместном внесении биоугля с НАФК, которое варьировало 18 до 79 мг/кг в среднеокультуренной почве и от 28 до 95 мг/кг – в высокоокультуренной почве. В последующие годы исследования содержание нитратного азота в данных вариантах также сохранялось на более высоком уровне по сравнению с вариантами без биоугля и варьировало от 15 до 45 мг N-NO<sub>3</sub>/кг почвы, без достоверных различий между вариантами с различной окультуренностью.

Аналогичные результаты, установившие увеличение содержания нитратов в почвах с биоуглем, были получены во многих лабораторных и полевых экспериментах [26–28]. Отмечали, что каждая почва характеризуется той или иной концентрацией нитратного азота, которая зависела от кислотности, температуры, влажности, количества органического вещества, соотношения C : N в данном органическом веществе. В результате круговорота веществ нитраты в больших количествах вымываются в нижележащие горизонты или улетучиваются в результате процесса денитрификации из почвы в атмосферу. Внесение в почву биоугля как мелиоранта, характеризующегося пористой структурой и большой удельной поверхностью, способствует изменению физических условий среды и увеличивает адсорбцию влаги [29] и удержание минеральных элементов, в том числе нитратного азота. В этой связи почвы с биоуглем накапливают больше нитратного азота, что имеет существенное экологическое значение для питания растений. Согласно результатам недавних лабораторных исследований [30], внесение биоугля как в средне-, так и в высокоокультуренную дерново-подзолистую супесчаную почву также приводило к накоплению достоверно большего количества нитратов по сравнению с контрольным вариантом, что способствовало повышению доступности выращиваемым культурам минерального азота из почвы данного варианта.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, внесение древесного биоугля в дозе 1% от массы дерново-подзолистой супесча-

ной почвы, во-первых, не оказало влияния на концентрацию аммонийного азота как в среднеокультуренной, так и в высокоокультуренной почве, во-вторых, способствовало увеличению концентрации нитратного азота в 1-й год исследования в 1.3 раза, как по сравнению с почвой в контрольном варианте, так и с почвой с минеральным удобрением. В последующие годы исследования последствие биоугля в почве сохранялось и выразилось в тренде увеличения содержания минерального азота по сравнению с почвами без биоугля. При этом содержание нитратного азота в высоко окультуренной почве было достоверно больше ( $p < 0.05$ ) во всех вариантах опыта по сравнению с содержанием нитратного азота в среднеокультуренной почве.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корчагин В.А., Шевченко С.Н., Зудилин С.Н., Горянин О.И. Инновационные технологии возделывания полевых культур в АПК Самарской области: Учеб. пособ. Кинель: РИЦ СГСХА, 2014. 192 с.
2. Glaser B., Birk J. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio) // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2012. V. 82. P. 39–51.
3. Verheijen F., Jeffery S., Bastos A.C. Biochar application to soils, a critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. Luxembourg: Office for the Official Publications of the European Communities, 2009. 149 p.
4. Bourke J., Manley-Harris M., Fushimi C. Do all carbonized charcoals have the same structure? A model of the chemical structure of carbonized charcoal // *J. Industr. Engin. Chem. Res.* 2007. V. 46. P. 5954–5967.
5. Chan K.Y., Van Zwieten L., Meszaros I., Downie A., Joseph S. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment // *Austral. J. Soil Res.* 2007. V. 45. № 8. P. 629–34.
6. Sohi S., Krull E., Lopez-Capel E. A review of biochar and its use and function in soil // *Advanc. Agron.* 2010. V. 105. P. 47–82.
7. Dempster D.N., Jones D.L., Murphy D.V. Organic nitrogen mineralization in two contrasting agro-ecosystems is unchanged by biochar addition // *Soil Biol. Biochem.* 2012. V. 48. P. 47–50.
8. DeLuca T.H., MacKenzie M.D., Gundale M.J. Biochar effects on soil nutrient transformation // *Biochar for environmental management: Science and technology* / Eds. Lehmann J., Joseph S. London: Earthscan, 2009. P. 251–270.
9. Jones D., Rousk J., Edwards-Jones G., DeLuca T.H., Murphy D.V. Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial // *Soil Biol. Biochem.* 2012. V. 45. P. 113–124.
10. Karer J., Wimmer B., Zehetner F., Kloss S., Soja G. Biochar application to temperate soils: effects on nutrient uptake and crop yield under field conditions // *Agric. Food Sci.* 2013. V. 22. P. 390–403.

11. *McCormack S.A., Ostle N, Bargett R.D., Hopkins D.W. and Vanbergen A.J.* Biochar in bioenergy cropping systems: impacts of soil faunal communities and linked ecosystem processes // *Global Change Biol. Bioenergy*. 2013. V. 5. № 2. P. 81–95.
12. *Lehmann J., Rillig M.C., Thies J.* Biochar effects on soil biota – A review // *Soil Biol. Biochem.* 2011. V. 43. P. 1812–1836.
13. *Van Zwieten L., Kimber S., Morris S., Downie A., Berger E., Rust J., Scheer C.* Influence of biochars on flux of N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> from Ferrosol // *Austr. J. Soil. Res.* 2010. V. 48. № 6–7. P. 555–568
14. *Юркевич Ю.Д.* Производство древесного угля // *Леспротоминформ*. 2010. № 3(69). С. 140–145.
15. *Соколов О.А., Семенов В.М.* Методология оценки азотного питания сельскохозяйственных культур // *Агрохимия*. 1994. № 9. С. 137–149.
16. *Сычев В.Г., Шафран С.А., Аникст Д.М., Листова М.П., Прошкин В.А., Романенков В.А.* Основные направления исследований по агрохимии азота в современном земледелии // *Бюл. Географической сети опытов с удобрениями*. М., 2009. Вып. 6. 76 с.
17. *Кудеяров В.Н.* Цикл азота в почве и эффективность удобрений. М.: Наука, 1989. 214 с.
18. *Минеев В.Г.* Агрохимия. Учебник. 2-е изд. М.: КолосС, 2004. 720 с.
19. *Свистова И.Д.* Влияние многолетнего внесения удобрений на почвенно-поглощающий комплекс и микробного сообщества выщелоченного чернозема // *Агрохимия*. 2004. № 6. С. 16–23.
20. *Минеев В.Г., Козлова Ю.Е., Кураков А.В.* Влияние последствий минеральных удобрений на микробиологические и агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы // *Докл. РАСХН*. 2001. № 4. С. 19–21.
21. *Гамзиков Г.П.* Агрохимия азота в агроценозах. Новосибирск: РАСХН, СО, НовосибирскГАУ, 2013. 790 с.
22. *Минеев В.Г., Кинжаев Р.Р., Арзамазова А.В.* Влияние длительного действия и последствий удобрений на агрохимические свойства дерново-подзолистой почвы и динамику изменения биогенных и токсичных элементов в агроценозе // *Агрохимия*. 2007. № 6. С. 5–13.
23. *Castaldi S., Rounding M., Baronti S.* Impact of biochar application to a Mediterranean wheat crop on soil microbial activity and greenhouse gas // *Chemosphere*. 2011. V. 85. P. 1464–1471.
24. *Банкина Т.А., Рижия Е.Я., Орлова Н.Е., Милосердова В.А., Груздева Ю.И.* Влияние биоугля на содержание лабильного углерода и минеральных форм азота в дерново-подзолистой супесчаной почве // *Тр. Всерос. Научн. Конф. с международ. участием “Почвы в биосфере”, посвящ. 50-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН*. Новосибирск, 10 сентября–14 октября 2018 г. С. 21–25.
25. *Завалин А.А., Соколов О.А.* Поток азота в агроэкосистеме: от идей Д.Н. Прянишникова до наших дней. М.: ВНИИА, 2016. 591 с.
26. *Bengtsson G., Bengtson P., Månsson K.F.* Gross nitrogen mineralization, immobilization and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity // *Soil Biol. Biochem.* 2003. V. 35. P. 143–154.
27. *Libutti A., Mucci M., Francavilla M.* Effect of biochar amendment on nitrate retention in a silty clay loam soil // *Ital. J. Agron.* 2016. V. 11. P. 273–276.
28. *Knowles O.A., Robinson B.H., Contangelo A.* Biochar for the mitigation of nitrate leaching from soil amended with biosolids // *Sci. Total Environ.* 2011. V. 409. P. 3206–3210.
29. *Литвинович А.В., Хаммам А.А.М., Лаврищев А.В., Павлова О.Ю.* Мелиоративные свойства и удобрительная ценность различных по размеру фракций биоугля (по данным лабораторных экспериментов) // *Агрохимия*. 2016. № 9. С. 46–53.
30. *Рижия Е.Я., Бучкина Н.П., Мухина И.М., Белинец А.С., Балашов Е.В.* Влияние биоугля на свойства образцов дерново-подзолистой супесчаной почвы с разной степенью окультуренности (лабораторный эксперимент) // *Почвоведение*. 2015. № 2. С. 211–220.

## Effect of Biochar on the Content of Mineral Forms of Nitrogen in Sod-Podzolic Sandy Loam Soil with Different Fertility

E. Ya. Rizhiya<sup>a,\*</sup>, N. P. Buchkina<sup>a</sup>, and E. V. Balashov<sup>a</sup>

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

<sup>\*</sup> *E-mail: alenarizh@yahoo.com*

In a three-year field experiment a dynamics of ammonium and nitrate nitrogen content in the sod-podzolic sandy loam soil with different fertility was studied after incorporation of wood biochar at a rate of 1% of soil weight. In vegetation vessels, located at field conditions, the studies were carried out in the following treatments: 1 – soil-control, 2 – soil with biochar, 3 – soil with mineral fertilizer and 4 – soil with the combined application of biochar and mineral fertilizer were studied. The results of the studies showed that the application of biochar did not affect the content of ammonium nitrogen, but significantly increased the content of nitrate nitrogen as compared to that in the treatments without biochar.

*Key words:* ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, wood biochar, sod-podzolic soil, degree of soil fertility.

УДК 633.253:633.321:631.8:631.582(470.32)

## ПРОДУКТИВНОСТЬ ОДНОЛЕТНИХ ТРАВ И КЛЕВЕРА ПРИ ПОСЛЕДЕЙСТВИИ УДОБРЕНИЙ В ЗЕРНОПАРОПРОПАШНОМ СЕВООБОРОТЕ В ЦЧР

© 2020 г. О. А. Минакова<sup>1,\*</sup>, Л. В. Александрова<sup>1</sup>, Т. Н. Подвигина<sup>1</sup>

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

*\*E-mail: olalmin2@rambler.ru*

Поступила в редакцию 19.12.2019 г.

После доработки 24.01.2020 г.

Принята к публикации 11.05.2020 г.

Последствие удобрений, примененных в севообороте с сахарной свеклой, способствовало повышению урожайности зеленой массы клевера, начиная с 1-й ротации. Система удобрения N135P135K135 под сахарную свеклу + навоз 25 т/га в пару в наибольшей степени увеличивала среднюю урожайность клевера, гороха и горохоовсяной смеси. Со 2-й по 9-ю ротации на 21.7–31.2%, следующих после сахарной свеклы в клеверном звене. Последствие удобрений снижало содержание сырого протеина в культурах как при кратком, так и длительном их применении. Увеличение длительности внесения удобрений обеспечивало более стабильное содержание NPK в биомассе клевера.

*Ключевые слова:* удобрения, последствие удобрений, севооборот, клевер, горох, однолетние травы, кормовые единицы, сырой протеин.

**DOI:** 10.31857/S0002188120080074

### ВВЕДЕНИЕ

Развитие высокопродуктивного животноводства и увеличение поголовья скота требует обеспечения животных полноценными кормами [1], что возможно при широком возделывании однолетних и многолетних трав. Эти культуры имеют высокую кормовую ценность, 1 кг сена горохоовсяной смеси содержит 0.55 кормовых единиц (к.е.), 1 кг сена клевера ранней уборки – 0.52 к.е. [2].

Травы в севооборотах имеют огромное агрономическое значение [3], главным их ценным свойством является поддержание гумусового состояния почвы. Например, многолетние травы обеспечивают поступление растительных остатков в размере 8–12 т/га [4], однолетние – 1.4–2.8 т/га [5]. Травы компенсируют потери органического вещества [6], что позволяет не вносить навоз в севообороте, либо сократить его применение в 2.8–3.4 раза [7, 8]. Отсутствие удобрений в севообороте с травами сокращает в 3 раза потери гумуса (относительно пропашного севооборота) [9]. Они также улучшают физико-химические свойства почвы [3]. Фиксация атмосферного азота бобовыми, которыми в основном и представлены травы, улучшает азотный режим почвы, зернобобо-

вые культуры и викоовсяная смесь способны его фиксировать в количестве 36–60 кг/га, с коэффициентом азотфиксации – 0.49–0.54, клевер – в количестве 96–180 кг/га, с коэффициентом азотфиксации – 0.82 [5, 10]. Количество минерального азота почвы после зернобобовых увеличивается на 8–12, многолетних бобовых трав – на 40–80 кг/га [10].

Велика ценность трав для формирования научно обоснованных севооборотов. Клевер – великолепный предшественник для озимых, сахарной свеклы, картофеля, он очищает поля от сорняков, бобово-злаковые смеси вследствие ранней уборки являются хорошим предшественником для озимых [11].

Одно- и многолетние травы хорошо реагируют на внесение удобрений [12–14]. В севооборотах с внесением удобрений под сахарную свеклу травы используют их последствие и способны формировать значительный урожай зеленой массы [15, 16], возделывание сахарной свеклы в звене с многолетними травами возможно при внесении сниженных на 50% доз азотных и на 33–43% – доз фосфорных удобрений [17]. Фосфорные удобрения положительно влияют на урожай многолет-

**Таблица 1.** Урожайность зеленой массы клевера, 1–9-я ротации, т/га

Ротации								
1-я	2-я	4-я	5-я	6-я	7-я	8-я	9-я	
Без удобрений								
9.33	13.6	22.8	14.4	10.6	13.8	13.2	16.4	
N45P45K45 + навоз 25 т/га								
10.4	14.6	22.5	16.2	12.1	15.9	19.1	19.6	
N90P90K90 + навоз 25 т/га								
11.2	15.0	25.5	16.7	12.8	15.2	17.7	20.4	
N135P135K135 + навоз 25 т/га								
11.8	15.6	24.8	16.7	11.8	16.6	19.9	20.0	
N45P45K45 + навоз 50 т/га								
11.6	14.7	25.5	16.3	11.9	16.2	20.3	19.2	

них трав [5], также отмечено положительное влияние бобовых трав не только на урожайность первой, но и последующих культур севооборота [3, 18, 19].

Цель работы – изучение продуктивности однолетних трав и клевера при последствии удобрений в зернопаропропашном севообороте.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В стационарном опыте ВНИИСС (год закладки – 1936, продолжается и в настоящее время) многолетние травы (клевер) и однолетние травы (травосмесь овса и гороха) возделывали соответственно как 2-ю и 3-ю культуру после удобренной сахарной свеклы. Опыт представляет собой 9-польный зернопаропропашной севооборот. Чередуя культуры в севообороте следующее: черный пар – озимая пшеница – сахарная свекла – ячмень с подсевом клевера – клевер 1-го года пользования – озимая пшеница – сахарная свекла – однолетние травы (горохоовсяная смесь) – овес. В 2017 г. закончилась 9-я ротация севооборота.

Климат района исследования – умеренно-континентальный с неустойчивым увлажнением. Почва опытного участка – чернозем выщелоченный малогумусный среднемошный тяжелосуглинистый.

Минеральные удобрения получала только сахарная свекла, навоз вносили в черном пару, остальные культуры использовали их последствие.

Изучали влияние последствия удобрений на урожайность трав в вариантах: N45P45K45 + навоз 25 т/га, N90P90K90 + навоз 25 т/га,

N135P135K135 + навоз 25 т/га, N45P45K45 + навоз 50 т/га и в контроле (без удобрений). Определение урожайности однолетних трав и клевера производили методом пробных площадок; посевная площадь делянки 162 м<sup>2</sup>, учетная – 4 м<sup>2</sup>. Содержание сырого протеина в растениях определяли по ГОСТ 10846-91 [20], азота, фосфора и калия – из одной навески по Куркаеву.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что в 1-й ротации урожайность зеленой массы клевера составила 9.33–11.8 т/га, во 2-й – 13.6–15.6, в 4-й – 22.5–25.5, в 5-й – 14.4–16.7, в 6-й – 10.6–12.8, в 7-й – 13.8–16.6, в 8-й – 13.2–19.9, в 9-й – 16.4–20.4 т/га (табл. 1).

Клевер хорошо реагировал на последствие удобрений, увеличивая урожайность зеленой массы относительно контроля в 1-й ротации на 11.5–26.5%, во 2-й – на 7.35–14.7, в 4-й – на 8.77–11.8, в 5-й – на 12.5–16.0, в 6-й – на 11.3–20.7, в 7-й – на 10.1–20.3, в 8-й – на 34.1–53.8, в 9-й – на 17.1–24.4%, что свидетельствовало о том, что последствие проявилось уже в 1-й ротации, в дальнейшем его влияние стабилизировалось, за исключением подъема в 8-й ротации, что возможно было связано со значительным потеплением климата в этот период. Средняя урожайность за 9 ротаций составила в контроле 14.3 т/га, при действии системы удобрения N45P45K45 + навоз 25 т/га – 16.3, N90P90K90 + навоз 25 т/га – 16.8, N135P135K135 + навоз 25 т/га – 17.1, N45P45K45 + навоз 50 т/га – 17.8 т/га, увеличение относительно неудобренного варианта составило 14.0–24.5%, максимальным оно было при применении N45P45K45 + навоз 50 т/га, минимальным – при N45P45K45 + навоз 25 т/га.

Изменения урожайности зеленой массы клевера с 1-й по 9-ю ротацию в контрольном варианте составили 13.6–244%, при последствии N45P45K45 + навоз 25 т/га – 16.3–216, N90P90K90 + навоз 25 т/га – 14.3–277, N135P135K135 + навоз 25 т/га – 32.2–210, N45P45K45 + навоз 50 т/га – 39.7–220%, что свидетельствовало о стабилизирующем влиянии удобрений на урожайность данной культуры, кроме системы N90P90K90 + навоз 25 т/га, где показатель возрастал до 277%. В течение всех ротаций наибольшая урожайность культуры была отмечена при действии системы N135P135K135 + навоз 25 т/га, в 1–2-й и 4–6-й ротациях высокая величина показателя отмечена при действии системы N90P90K90 + навоз 25 т/га, в 7–9-й ротациях – при действии N45P45K45 + навоз 50 т/га.

**Таблица 2.** Урожайность гороха и горохоовсяной смеси (первый год последействия удобрений, 2-я ротация), т/га

Ротация (культура)		
2-я (горох)	9-я (однолетние травы)	
Урожайность		
зерна	соломы	зеленой массы
Без удобрений		
1.88	1.89	14.1
N45P45K45 + навоз 25 т/га		
2.07	2.14	18.5
N90P90K90 + навоз 25 т/га		
2.11	2.36	20.1
N135P135K135 + навоз 25 т/га		
2.07	2.40	20.7
N45P45K45 + навоз 50 т/га		
2.05	2.19	19.9
<i>HCP</i> <sub>05</sub>		
0.12	0.13	1.2

**Таблица 3.** Кормовая ценность гороха (2-я ротация) и горохоовсяной смеси (9-я ротация), т к.е./га

Горох	Горохоовсяная смесь
Без удобрений	
2.57	2.54
N45P45K45 + навоз 25 т/га	
2.85	3.47
N90P90K90 + навоз 25 т/га	
2.94	3.67
N135P135K135 + навоз 25 т/га	
2.91	3.60
N45P45K45 + навоз 50 т/га	
2.88	3.78

Во 2-й ротации севооборота после сахарной свеклы возделывали горох на зерно, в 8–9-й ротациях в связи с часто повторявшимися майскими засухами получение зерна гороха стало невозможным (низкорослость растений, раннее завядание и крайне ничтожный урожай культуры, т.к. на одном растении формировалось 1–2 боба с 1–2 горошинами в каждом), вследствие этого в этом поле севооборота стали возделывать однолетние травы (горохоовсяную смесь).

Урожайность зерна гороха во 2-й ротации в удобренных вариантах составила 2.05–2.11 т/га (табл. 2), соломы – 2.14–2.40 т/га (в контроле – 1.88 и 1.89 т/га соответственно). Последствие

удобрений во 2-й ротации увеличило урожайность зерна гороха относительно контроля на 9.04–12.2% (более всего при применении N90P90K90 + навоз 25 т/га, менее всего – в варианте N45P45K45 + навоз 50 т/га), соломы – на 13.2–27.0%, максимальным ее урожай был при применении N135P135K135 + навоз 25 т/га и N90P90K90 + навоз 25 т/га. В 9-й ротации урожайность зеленой массы горохоовсяной смеси составила 14.1–20.7 т/га, увеличение относительно контроля в удобренных вариантах было равно 31.2–46.8%, более всего – при применении N135P135K135 + навоз 25 т/га.

Для оценки эффекта удобрений во времени рассчитывали кормовую ценность гороха и сравнили ее с аналогичным показателем для однолетних трав в 8–9-й ротациях. Сбор кормовых единиц горохоовсяной смеси в 9-й ротации составил при последствии удобрений 2.85–2.94 т к.е./га (табл. 3), относительно контроля (2.57 т к.е./га) он возрос на 10.9–14.4%, более всего в вариантах с N90P90K90 + навоз 25 т/га и N135P135K135 + навоз 25 т/га.

Горохоовсяная смесь в 9-й ротации имела кормовую ценность от 2.54 в контроле до 3.47–3.78 т к.е./га при последствии удобрений, максимальной она была при применении N45P45K45 + навоз 50 т/га. Увеличение во времени кормовой ценности культуры, следующей после сахарной свеклы, в варианте с N45P45K45 + навоз 25 т/га составило 21.7%, N90P90K90 + навоз 25 т/га – 24.8%, N135P135K135 + навоз 25 т/га – 23.7%, N45P45K45 + навоз 50 т/га – 31.2%, а в контроле она достоверно не изменялась (снижение на 1.17%).

Содержание сухого вещества в зеленой массе горохоовсяной смеси составило в контроле 27.2% (табл. 4), в удобренных вариантах – 26.3–28.3%, в основном последствие удобрений повышало этот показатель на 0.3–1.1 абс.%, только при применении системы N135P135K135 + навоз 25 т/га отмечено снижение этого показателя на 0.9 абс.%. Содержание сухого вещества в зеленой массе клевера было несколько больше (на 0.4–1.0 абс.%) и составило 27.3–28.7%, более всего в контроле (28.7%). Данный показатель у клевера при последствии достоверно снижался на 0.8–1.6 абс.%, более всего при применении N135P135K135 + навоз 25 т/га и N45P45K45 + навоз 50 т/га, только в варианте N45P45K45 + навоз 25 т/га он достоверно не изменялся.

В сухом веществе горохоовсяной смеси содержалось 2.54–3.78 т к.е./га (табл. 4) (в контроле – 2.54 т к.е./га), применение удобрений увеличивало данный показатель вследствие возросшей уро-

жайности на 36.6–48.8%, максимально – в вариантах N45P45K45 + навоз 50 т/га и N90P90K90 + + навоз 25 т/га. Кормовая ценность клевера была сопоставима с кормовой ценностью горохоовсяной смеси (2.45–3.57 т к.е./га), максимальной она была при системах N90P90K90 + навоз 25 т/га и N45P45K45 + навоз 50 т/га, последствие удобрений проявилось в увеличении данного показателя относительно контроля на 35.1–45.7%. Влияние последствия на кормовую ценность культуры во 2-й ротации было значительно меньше (увеличение относительно контроля на 12.2–20.4%), чем в 9-й ротации. От 2-й к 9-й ротации кормовая ценность клевера возросла на 66.7–108%, менее всего – в контроле, более всего – при последствии N90P90K90 + навоз 25 т/га.

Содержание сырого протеина в сухом веществе клевера во 2-й ротации составило 14.1–16.5% (табл. 6) (в контроле – 16.4%), в 9-й ротации – 11.1–14.0% (в контроле – 11.1%), за этот период произошло снижение данного показателя на 2.5–5.3 абс.%, более всего – в контроле, менее всего – при последствии N135P135K135 + навоз 25 т/га и N45P45K45 + навоз 50 т/га. В экспериментальных вариантах с горохом не отмечено достоверного изменения данного показателя, также не выявлены изменения и средних показателей для 2-х культур во 2-й ротации.

К 9-й ротации содержание сырого протеина не зависело от последствия удобрений, только в клевере варианте N45P45K45 + навоз 50 т/га было отмечено повышение его содержания на 2.9 абс.%. При этом отмечено достоверное снижение содержания протеина в горохоовсяной смеси на 0.25–1.13 абс.%, более всего – в варианте N90P90K90 + навоз 25 т/га, менее всего – в вариантах N45P45K45 + навоз 25–50 т/га. Среднее содержание протеина в кормовых культурах также не было подвержено достоверным изменениям, отмечена тенденция к увеличению на 1.35 абс.% в варианте N45P45K45 + + навоз 50 т/га.

Замена гороха на горохоовсяную смесь отрицательно сказалась на кормовой ценности культуры, следующей после удобренной сахарной свеклы в звене с клевером. Произошло снижение показателя в 1.28–1.85 раза, с увеличением доз удобрений разница увеличивалась, кроме варианта N45P45K45 + навоз 50 т/га, где этот показатель был самым низким. Средняя величина содержания сырого протеина для 2-х культур в 9-й ротации также снизилась в 1.64–2.00 раза, более всего – при последствии системы N90P90K90 + + навоз 25 т/га, менее всего – в варианте N45P45K45 + навоз 50 т/га, также значительно оно снижалось и в контроле (на 86.5%).

**Таблица 4.** Содержание сухого вещества и кормовая ценность зеленой массы клевера и однолетних трав (2-я и 9-я ротации), т к.е./га

Клевер, 2-я ротация, т к.е./га	Однолетние травы, 9-я ротация		Клевер, 9-я ротация	
	сухое вещество, %	т к.е./га	сухое вещество, %	т к.е./га
Без удобрений				
1.47	27.2	2.54	28.7	2.45
N45P45K45 + навоз 25 т/га				
1.65	28.3	3.47	28.6	3.51
N90P90K90 + навоз 25 т/га				
1.72	27.6	3.67	27.9	3.57
N135P135K135 + навоз 25 т/га				
1.67	26.3	3.60	27.3	3.42
N45P45K45 + навоз 50 т/га				
1.77	27.3	3.78	27.5	3.31

**Таблица 5.** Содержание сырого протеина, % сухого вещества

Ротация					
2-я			9-я		
клевер	горох	среднее для 2-х культур	клевер	горохо-овсяная смесь	среднее для 2-х культур
Без удобрений					
16.4	19.6	18.0	11.1	8.19	9.65
N45P45K45 + навоз 25 т/га					
15.7	18.8	17.2	11.2	7.94	9.57
N90P90K90 + навоз 25 т/га					
15.3	21.4	18.3	11.1	7.06	9.08
N135P135K135 + навоз 25 т/га					
14.1	21.1	17.6	11.6	7.50	9.55
N45P45K45 + навоз 50 т/га					
16.5	19.8	18.1	14.0	7.94	11.0
<i>HCP</i> <sub>05</sub>					
0.2	–	–	–	0.10	–

Последствие удобрений во 2-й ротации достоверно увеличивало содержание  $K_2O$  в сухом веществе клевера с 1.76% (табл. 7) в контроле до 1.92–2.14% в удобренных вариантах, максимум отмечен при применении N135P135K135 + навоз 25 т/га, что составило 9.09–21.6%. Содержание  $P_2O_5$  не было в относительном выражении подвержено изменениям, отмечена только тенден-

**Таблица 6.** Содержание основных элементов питания в биомассе клевера (2-я и 9-я ротации), %

Ротация					
2-я			9-я		
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
Без удобрений					
2.63	0.57	1.76	1.77	0.69	2.26
N45P45K45 + навоз 25 т/га					
2.52	0.57	1.77	1.80	0.85	2.42
N90P90K90 + навоз 25 т/га					
2.45	0.59	1.92	1.78	0.64	2.00
N135P135K135 + навоз 25 т/га					
2.26	0.58	2.14	1.86	0.69	2.14
N45P45K45 + навоз 50 т/га					
2.64	0.60	2.01	2.24	0.68	2.15
HCP <sub>05</sub>					
0.17	—	0.14	—	—	0.12

**Таблица 7.** Содержание основных элементов питания в горохоовсяной смеси (9-я ротация), %

N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Без удобрений		
1.31	0.94	1.70
N45P45K45 + навоз 25 т/га		
1.27	0.90	1.94
N90P90K90 + навоз 25 т/га		
1.13	1.11	1.95
N135P135K135 + навоз 25 т/га		
1.20	0.95	1.96
N45P45K45 + навоз 50 т/га		
1.27	0.95	1.97
HCP <sub>05</sub>		
—	—	0.12

ция к его повышению на 0.02–0.03 абс.%, содержание азота достоверно снижалось на 10.3–14.1%, более всего при применении системы N135P135K135 + навоз 25 т/га.

К 9-й ротации содержание азота в растениях клевера повысилось на 0.40–0.86 абс.%, более всего в контроле и в варианте N45P45K45 + навоз 25 т/га, что очевидно было связано с особенностями современных сортов. Была отмечена тенденция к увеличению его содержания относительно контроля при применении N135P135K135 + навоз 25 т/га и N45P45K45 + навоз 50 т/га. Также было больше и содержание P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, (на 0.05–

0.28%) и K<sub>2</sub>O (на 0.08–0.65%), с увеличением доз разница уменьшалась. Удобрения в 9-й ротации не способствовали достоверному изменению содержания P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> относительно контроля, но снижали содержание K<sub>2</sub>O, на 4.87–11.5%, более всего при применении системы N90P90K90 + навоз 25 т/га. Была установлена тенденция к повышению содержания N при внесении N45P45K45 + навоз 50 т/га, в других вариантах различий не было отмечено.

В 9-й ротации содержание NPK в горохоовсяной смеси составило: N – 1.13–1.27% от сухого вещества, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 0.90–1.11%, K<sub>2</sub>O – 1.70–1.97%. Влияние удобрений прослежено только в отношении изменения содержания K<sub>2</sub>O, его содержание относительно контроля возросло на 14.1–15.9%, более всего – при последствии N45P45K45 + навоз 50 т/га. Проявлялась тенденция к снижению содержания N при последствии систем N90P90K90 + навоз 25 т/га и N135P135K135 + навоз 25 т/га (до 13.7%), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – к повышению при действии системы N90P90K90 + навоз 25 т/га (до 18.1%).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, уже во 2-й ротации зернопаро-пропашного севооборота последствие удобрений способствовало значительному увеличению урожайности зеленой массы клевера, ее повышение относительно контрольного варианта составило 11.5–26.5%, тогда как в 9-й ротации – 17.1–24.4%, с увеличением длительности применения удобрений не отмечали увеличения урожайности культуры, но при этом варианты с последствием низких доз минеральных удобрений (N45P45K45 + навоз 25 т/га и N45P45K45 + навоз 50 т/га) с течением времени способствовали большему повышению урожайности клевера относительно контроля, чем во 2-й ротации.

Средняя урожайность зеленой массы клевера за 9 ротаций увеличивалась на 14.0–24.5% относительно контроля, наибольшее влияние оказала система удобрения N135P135K135 + навоз 25 т/га. Отмечено стабилизирующее влияние удобрений на урожайность клевера в ротациях, выразившееся в снижении варьирования показателя в экспериментальных вариантах.

Последствие удобрений во 2-й ротации повысило содержание кормовых единиц в горохе на 10.9–14.4% относительно контрольного варианта, в 9-й ротации в однолетних травах – более значительно (на 36.6–48.8%), что свидетельствовало

о повышении влияния удобрений на этот показатель с течением времени.

Содержание кормовых единиц в культурах, использующих последствие удобрений на первый год после сахарной свеклы в клеверном звене, в 9-й ротации повысилось на 21.7–31.2% относительно 2-й ротации, наибольший эффект отмечен в варианте N45P45K45 + навоз 50 т/га.

В вариантах с последствием удобрений в 9-й ротации кормовая ценность клевера была более высокой, чем горохоовсяной смеси, повышение относительно контроля составило 36.6–48.8 и 35.1–45.7% соответственно. От 2-й к 9-й ротации кормовая ценность клевера в удобренных вариантах возросла на 87.0–113%.

Последствие удобрений, примененных в севообороте, отрицательно сказалось на содержании сырого протеина в биомассе культур, отмечено снижение его содержания, в большей степени – в клевере во 2-й ротации (на 2.5–5.3 абс.%), в меньшей степени – в однолетних травах в 9-й ротации (на 0.25–1.13 абс.%). Замена гороха однолетними травами в 1.64–2.0 раза снизила содержание сырого протеина в среднем для 2-х культур (горох + клевер во 2-й ротации и однолетние травы + клевер в 9-й ротации), но удобрения способствовали сокращению разницы вследствие стабилизации содержания протеина в клевере в 9-й ротации.

Увеличение длительности внесения удобрений способствовало более стабильному содержанию основных элементов питания в растениях клевера, количество общего N и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> относительно контроля в 9-й ротации не изменялось, отмечено снижение содержания K<sub>2</sub>O на 4.8–11.5%, тогда как во 2-й ротации отмечено повышение содержания K<sub>2</sub>O на 10.3–14.1% и на 9.1–21.6% – общего N (относительно варианта без удобрений).

Содержание P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> в сухом веществе клевера как в удобренных вариантах, так и в контроле от 2-й к 9-й ротации повысилось на 0.05–0.28 абс.%, N – на 0.40–0.86, K<sub>2</sub>O – на 0.08–0.65%, что было связано с особенностями химического состава современных сортов культуры.

Последствие примененных в течение 9-ти ротаций севооборота удобрений способствовало достоверному повышению содержания K<sub>2</sub>O в сухом веществе горохоовсяной смеси относительно варианта без последствия удобрений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анисимова Т.Ю.* Влияние применения органических удобрений на основе торфа на продуктив-

ность однолетних трав в зернопропашном севообороте // Кормопроизводство. 2017. № 4. С. 6–10.

2. Об утверждении статистического инструментария для организации Министерством сельского хозяйства Российской Федерации федерального статистического наблюдения за заготовкой кормов. Приказ Росстата от 23 августа 2013 года. № 339. <http://docs.pravo.ru/document/view/45167281/51537017>. Дата обращения 1.08.2019.
3. *Дедов А.В.* Воспроизводство органического вещества почв в земледелии ЦЧР (вопросы теории и практики): Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Воронеж: ВГАУ, 2000. 46 с.
4. *Борисова Е.Е.* Роль в севооборотах многолетних трав // Вестн. НГИЭИ. 2015. № 8 (51). С. 12–19.
5. *Шелганов И.И., Доманов Н.М., Соловichenko В.Д.* Биологизация земледелия как начальный этап ресурсосбережения // Интенсификация, ресурсосбережение и охрана почв в адаптивно-ландшафтных системах земледелия. Курск: ВНИИЗ и ЗПЭ, 2008. С. 156–160.
6. *Черкасов Г.Н., Масютенко Н.П.* Основные направления сохранения и повышения плодородия черноземных почв // Актуальные проблемы почвоведения, экологии и земледелия. Сб. докл. науч.-практ. конф. с международ. участием Курского отд.-я МОО “Общество почвоведов им. В.В. Докучаева”. Курск, 22 апреля 2016. г. Курск: ВНИИ-ЗиЗПЭ, 2016. С. 3–7.
7. *Лазарев В.И., Айдиев А.Ю.* Динамика эффективного плодородия типичного чернозема в различных видах полевых севооборотов Курской области // Мат.-лы Международ. науч.-практ. конф. “Научные и практические основы сохранения плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения в адаптивно-ландшафтном земледелии” Белгород: Крестьянское дело, 2004. С. 209–213.
8. *Шомахов Ю.А.* Оптимизация минерального питания как фактор повышения продуктивности культур полевого севооборота // Методы изучения продукционного процесса растений и фотосинтеза. Мат.-лы Международ. науч. конф. 18–20 июня 2009, Нальчик. С. 102–106.
9. *Цвей Я.П., Недашковский А.И., Киселевская Т.А., Широконос А.Н.* Зависимость почвенного плодородия от размещения культур в короткоротационных севооборотах // Севооборот в современном земледелии. Сб. докл. Международ. науч. конф. М.: МСХА, 2004. С. 126–130.
10. *Берестецкий А.О.* Биологические факторы повышения плодородия почв // Вестн. Рос. сел.-хоз. науки. 1986. № 3. С. 29–38.
11. Растениеводство / Под ред. Вавилова П.П. М.: Агропромиздат, 1986. 512 с.
12. *Изместьев В.М., Свечников А.К., Соколова Е.А.* Влияние минеральных удобрений на плодородие дерново-подзолистых почв в кормовых севооборотах // Аграрн. наука Евро-Северо-Востока. 2016. № 6 (55). С. 37–41.
13. *Чухина О.В., Суров В.В., Токарева Н.В.* Качество и урожайность культур звена севооборота при при-

- менении удобрений и микробиологических препаратов в Вологодской области // Плодородие. 2015. № 1 (82). С. 25–29.
14. Шаповалов В.Ф., Харкевич Л.П., Белоус И.Н., Анишина Ю.А. Влияние средств химизации и способов обработки почвы на продуктивность и качество зеленой массы многолетних трав в условиях радиоактивного загрязнения // Пробл. агрохим. и экол. 2011. № 2. С. 29–33.
  15. Гаврилова А.Ю., Понкратенкова И.В., Мерзлая Г.Е. Влияние последствий органических и минеральных удобрений на урожайность и качество многолетних трав // Международ. научн.-исслед. журн. 2018. № 10–1 (76). С. 61–65.
  16. Минакова О.А., Александрова Л.В., Подвигина Т.Н. Урожайность культур и продуктивность зерно-свекловичного севооборота в лесостепи ЦЧР под влиянием удобрений (1936–2017 гг.) // Аграрн. Россия. 2019. № 6. С. 21–28.
  17. Сахарная свекла (основы агротехники) / Под ред. Зубенко В.Ф. Киев: Урожай, 1979. 416 с.
  18. Курдюков Ю.Ф., Лощина Л.П., Попова Ж.П., Шубитидзе Г.В., Кузьмичев Ф.П., Третьяков М.В. Роль многолетних трав в полевых севооборотах засушливой степи Поволжья // Аграрн. вестн. Юго-Востока. 2009. № 2 (2). С. 38–42.
  19. Яковлева М.И., Дементьев Д.А., Салюкова Н.Н. Действие и последствие зернобобовых культур в звеньях севооборота // Перм. аграрн. вестн. 2017. № 2 (18). С. 91–96.
  20. ГОСТ 10846-91. Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка. Межгосударственный стандарт. Дата введения 1993-06-01.

## Productivity of Annual Grasses and Clover with After-Effect of Fertilizings in a Grain-Arable Crop Rotation of the Central Black-Earth Region

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

<sup>a</sup> A.L. Mazlumov All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar pos. VNIISS 86, Voronezh region, Ramonsky district 396030, Russia

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

After-effect of fertilizers applied in a crop rotation with sugar beet promoted improvement of clover green mass yield beginning with the 1<sup>st</sup> rotation. The system of N135P135K135 for sugar beet + manure 25 t/h in a fallow increased average yield of clover, peas and grass mixture of peas + oats to the greatest extent. From 2<sup>nd</sup> to 9<sup>th</sup> rotation, forage values of the crops following sugar beet in the link with clover increased. After-effect of both short- and long-term applied fertilizers reduced crude protein content in the crops. The augmentation of duration of fertilizers' application provided more stable content of NPK in clover. The longer fertilizers' application provided the more stable NPK content in clover.

*Key words:* fertilizers, after-effect, crop rotation, clover, peas, annual grasses, feed units, crude protein.

УДК 631.816.32:633.521

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПЛЕКСНОГО УДОБРЕНИЯ ПОД ЛЕН-ДОЛГУНЕЦ<sup>1</sup>

© 2020 г. Н. Н. Кузьменко

*Институт льна – филиал Федерального научного центра лубяных культур  
172002 Торжок, Тверская обл., ул. Луначарского, 35, Россия*

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

Поступила в редакцию 26.11.2019 г.

После доработки 21.12.2019 г.

Принята к публикации 10.03.2020 г.

Определены оптимальные параметры размещения в почве комплексного удобрения состава N5P25K30B0.3 при припосевном ленточном внесении под лен-долгунец. Локальное внесение комплексного удобрения в дозе 200 кг/га в междурядья через 15 см на глубину 7 см от поверхности почвы в сравнении с разбросным внесением под культивацию повысило активность корневой системы, коэффициент использования фосфора из удобрения – на 2.6, калия – на 8.7%, урожайность льно-волокна – на 1.9 ц/га. Окупаемость удобрения увеличилась на 1.57 кг/кг, биоэнергетическая эффективность – на 0.9 ед. Благодаря совмещению операции посева льна с внесением удобрения затраты труда снизились на 0.64 чел.-ч/га, расход ГСМ – на 2.2 кг/га.

*Ключевые слова:* лен-долгунец, комплексное удобрение, локальное внесение удобрения, ширина междурядья, глубина заделки.

**DOI:** 10.31857/S000218812006006X

### ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях при высоких ценах на удобрения особое значение имеет поиск оптимальных способов их применения, позволяющих получить максимальный эффект, рационально использовать потенциал растений и имеющиеся ресурсы. Традиционная технология применения минеральных удобрений под лен-долгунец, предусматривающая внесение полной дозы удобрений до посева, с последующей заделкой почвообрабатывающими орудиями является высокопроизводительной, но имеет ряд недостатков. В первую очередь большая неравномерность (до 60–80%) распределения удобрений по поверхности и глубине обрабатываемого слоя почвы, что, как правило, приводит к неравномерному стеблестоя льна и снижению урожайности и качества продукции [1, 2].

Наиболее перспективным способом использования удобрений является локальное их внесение, при котором сокращается контакт удобрений с почвой, питательные вещества внутри ленты остаются в легкодоступной форме, коэффициенты использования питательных веществ на 10–15%

больше, чем при разбросном способе внесения. В связи с этим оптимальные дозы удобрений при локальном внесении на 30–50% меньше, чем рекомендуемые для разбросного внесения, что особенно актуально в условиях высоких цен на минеральные удобрения [2, 3].

При выборе способов внесения удобрений под лен-долгунец необходимо учитывать ряд специфических особенностей этой культуры. Культура мелкосемянная, глубина заделки семян составляет 1.5–3.0 см, как правило, возделывается узкорядным способом с шириной междурядья 7.5 см. При повышенной концентрации удобрений в почве дружность прорастания и полевая всхожесть семян льна снижаются в большей степени, чем, например, зерновых культур. В питательной среде льну необходимо более широкое соотношение между азотом, с одной стороны, и фосфором, калием, с другой. Получение высококачественного льноволокна во многом зависит от обеспеченности растений такими микроэлементами, как бор, цинк, медь. Все это свидетельствует о том, что льну-долгунцу необходимы специальные удобрения, соответствующие его биологическим особенностям [1, 4–6].

<sup>1</sup> Работа выполнена по Госзаданию № 075-00853-19-00 и финансовой поддержке Минобрнауки РФ.

Цель работы – определение параметров размещения в почве комплексного удобрения состава N5P25K30B0.3 при локальном ленточном внесении под лен-долгунец и эффективности этого приема по сравнению с разбросным способом внесения.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Эффективность припосевного ленточного внесения комплексного удобрения сравнивали с разбросным способом его внесения под ранневесеннюю культивацию. Исследование проводили в Центральном районе Нечерноземной зоны (Тверская обл.) в полевых опытах на дерново-подзолистой среднесуглинистой почве. Реакция почвенной среды была от слабокислой до нейтральной ( $pH_{KCl}$  4.4–5.4), содержание подвижного фосфора (по Кирсанову) – высокое и очень высокое (216–350 мг/кг), калия – среднее и повышенное (94–136 мг/кг). Содержание подвижного бора по Никишкиной – от низкого до среднего (0.23–0.66 мг/кг), содержание подвижного цинка – низкое (0.20–1.24 мг/кг). Содержание гумуса (по Тюрину) менялось от 1.92 до 2.26%.

Параметры размещения удобрения в почве изучали в мелкоделяночных полевых опытах. Удобрение вносили непосредственно под семенные рядки и в междурядья с расстоянием между лентами 7.5 и 15 см (в каждое посевное междурядье и в каждое 2-е междурядье) на глубину 5 и 7 см от поверхности почвы в дозах 100 и 200 кг/га. Внесение удобрений и посев льна-долгунца сорта Торжокский-4 проводили вручную при помощи специальных маркеров. Площадь опытной деланки составляла 1 м<sup>2</sup>, повторность опытов шестикратная.

В техническом плане наиболее простым способом является расположение лент удобрений через 15 см, что возможно осуществить переоборудованной сеялкой СЗ–3,6А–0,2, оснащенной комбинированными сошниками. Поэтому одновременно с поиском оптимальных параметров изучали эффективность комплексного удобрения при его размещении в междурядья с расстоянием между лентами 15 см на глубину 5 и 7 см от поверхности почвы в дозах 100 и 200 кг/га. Площадь опытной деланки составляла 25 м<sup>2</sup>, повторность опытов четырехкратная.

Учеты и наблюдения в опытах проводили в соответствии с методикой [7]. Обработку почвы под лен-долгунец проводили согласно рекомендованной для данной зоны технологии возделывания. Предшественниками льна были яровые зерновые (овес и ячмень). Учет урожая проводили в

фазе ранней желтой спелости. Урожайные данные приведены к стандартным показателям по чистоте и засоренности и обработаны методом дисперсионного анализа.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

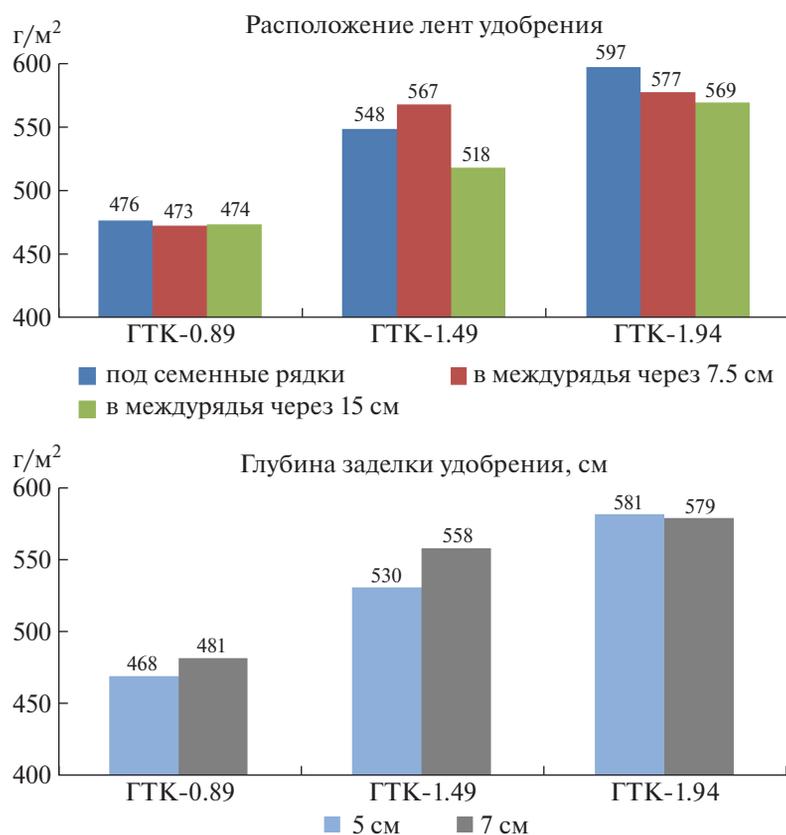
Условия влагообеспеченности льна больше всего определяют осадки мая–июля. Погоду в период вегетации растений хорошо отражает гидротермический коэффициент по Селянинову (ГТК). Если ГТК < 1.0, то погодные условия считаются засушливыми, если ГТК = 1.3–1.6, то погода в отношении влаги и тепла благоприятна для льна-долгунца, если ГТК ≥ 2.0, то этот показатель отражает избыток влаги [8].

Погодные условия в течение 3-х учетных лет различались по уровню увлажнения, что позволило наиболее полно выявить эффективность локального внесения комплексного удобрения под лен-долгунец. Один год отличался резким дефицитом влаги на протяжении всего периода вегетации (ГТК мая–августа = 0.89). Во 2-й год резкий дефицит влаги отмечен только в период посев–всходы (ГТК мая = 0.47). Условный баланс влаги в период интенсивного роста льна в июне–июле был близок к оптимальному и оставил 1.70. В среднем за май–август увлажнение было умеренным (ГТК = 1.49). Третий год отличался большим избытком влаги в период посев–всходы (ГТК мая = 3.28), умеренным увлажнением в июне (ГТК = 1.32) и дефицитом влаги в дальнейшем (ГТК июля–августа = 0.85–1.05). В среднем за май–август ГТК составил 1.94.

Поскольку при дозах 100 и 200 кг/га отмечали одинаковые закономерности изменения ростовых процессов льна, данные по влиянию параметров размещения удобрения в почве на сбор льносоломки приведены в среднем для 2-х доз (рис. 1).

Агрономическая эффективность при локальном внесении комплексного удобрения под лен-долгунец различалась по годам и зависела от агрометеорологических условий. Например, при резком дефиците влаги в течение всего периода вегетации (ГТК за май–август = 0.89) расположение лент удобрения относительно посевных рядков (непосредственно под рядки, либо в междурядья через 7.5 или 15 см) значения не имело. С увеличением глубины заделки с 5 до 7 см отмечена тенденция к увеличению продуктивности растений.

При нормальном увлажнении (ГТК за май–август = 1.49) больший сбор льносоломки (567 г/м<sup>2</sup>) получили при расположении лент удобрения в междурядья с расстоянием между лентами 7.5 см.



**Рис. 1.** Влияние параметров размещения в почве комплексного удобрения на сбор льносолумы,  $\text{г}/\text{м}^2$  (среднее для доз 100 и 200  $\text{кг}/\text{га}$   $HCP_{05}$  1-й год –  $F_{\text{факт}} > F_{\text{табл}}$ ,  $HCP_{05}$  2-й год – 22,  $HCP_{05}$  3-й год – 20  $\text{г}/\text{м}^2$ ).

При внесении под семенные рядки он снижался на  $19 \text{ г}/\text{м}^2$  (на 3.4%), при внесении в междурядья через 15 см достоверное снижение составило  $49 \text{ г}/\text{м}^2$  (8.6%). В этих условиях преимущество имела также более глубокая заделка удобрения в почве – прибавка составила  $28 \text{ г}/\text{м}^2$  (5.3%).

При избыточном увлажнении в первой половине вегетации (ГТК мая–июня = 2.30) большую продуктивность ( $597 \text{ г}/\text{м}^2$ ) обеспечило размещение удобрений под семенными рядками. При внесении удобрения в междурядья через 7.5 и 15 см отмечено ее достоверное снижение на 20 и  $31 \text{ г}/\text{м}^2$  (3.3 и 4.5%) в сравнении с внесением удобрения под семенные рядки. Увеличение глубины заделки удобрения не оказало влияния на сбор льносолумы.

При разбросном внесении сбор льносолумы в 1-й год составил 451, во 2-й год – 526 и в 3-й год – 556, в среднем –  $511 \text{ г}/\text{м}^2$ . В среднем за 3 года при расположении лент удобрения под семенными рядками сбор льносолумы в сравнении разбросным внесением увеличился на  $28.5 \text{ г}/\text{м}^2$  (на 5.7%), при внесении в междурядья через 7.5 см – на  $27.5 \text{ г}/\text{м}^2$

(на 5.5%), через 15 см – на  $9.5 \text{ г}/\text{м}^2$  (на 2.0%). С увеличением глубины заделки удобрения сбор соломы повысился на  $13.0 \text{ г}/\text{м}^2$  (на 2.5%).

Качество льносолумы зависело в большей степени от погодных условий, сложившихся в период формирования волокна, чем от способа внесения удобрения. При резком дефиците влаги получили льносолому с самыми низкими показателями: горстевая длина – 61–67 см, прочность – 24–26 кгс, содержание луба – 28–30%, номер – 1.10–1.25. Способы внесения в этих условиях не оказывали влияния. В более благоприятные годы для произрастания льна-долгунца локальное внесение удобрений увеличивало горстевую длину на 3–5 см, содержание луба – на 1–4%, номер льносолумы – на 0.25–0.50 ед. Закономерного изменения этих показателей в зависимости от горизонтального и вертикального размещения удобрения в почве не отмечено.

Четкой закономерности по изменению семенной продуктивности льна-долгунца в зависимости от горизонтального размещения удобрения в почве не прослежено, но отмечена тенденция к увеличению данного показателя при более глубо-

**Таблица 1.** Влияние способа внесения удобрения на массу, активность и распределение корневой системы льна-долгунца в период быстрого роста—бутонизации

Показатель	Без удобрения	Доза 200 кг/га, вразброс под культивацию	Доза 200 кг/га, в междурядья через 15 см на глубину 5 см	Доза 200 кг/га, в междурядья через 15 см на глубину 7 см
ГТК май—август = 0.87				
Воздушно-сухая масса корней, г/100 растений	3.32	3.56	4.57	3.85
Сосущая сила корней, атм.	1.35	2.55	2.90	3.40
Коэффициент продуктивности корней, ед.	8.90	8.91	9.00	9.43
ГТК май—август = 1.49				
Воздушно-сухая масса корней, г/100 растений	4.08	4.55	4.52	4.56
Сосущая сила корней, атм.	2.35	3.35	3.60	4.05
Коэффициент продуктивности корней, ед.	5.83	6.26	7.63	9.45
Доля корней в слое почвы, %				
0—10 см	80	80	70	74
11—20 см	20	20	30	26

кой заделке удобрения — на 7 см от поверхности почвы.

При резком дефиците влаги (ГТК = 0.89), приводящем к повышению концентрации ионов в очаге удобрения, у растений льна-долгунца увеличивалась масса корневой системы в период быстрого роста—бутонизации при локальном внесении удобрения на 16–38%, при разбросном способе внесения — на 7%. В условиях нормального увлажнения (ГТК = 1.49) способ внесения удобрения не оказывал влияния на массу корней (табл. 1).

Отметив в целом поверхностный характер корневой системы льна (70–84% массы корней располагалось в слое 0–10 см), наблюдали положительное влияние локализации удобрения на развитие корней в нижнем слое пахотного горизонта. При локальном внесении удобрения доля корней в слое 11–20 см составляла 26–30% против 20% при разбросном его внесении. Таким образом, меняя способ внесения удобрений, можно управлять распределением корневой системы в почве, что позволит лучше использовать питательные вещества и запасы почвенной влаги во всем пахотном горизонте.

Для активного поглощения элементов питания имели значение не только мощность корневой системы и ее распределение в слоях пахотного горизонта, но и физиологическая активность корней. Сосущая сила корней при локальном вно-

сении удобрения была больше на 0.25–0.85 атм., коэффициент продуктивности — на 0.09–3.19 ед. в сравнении с разбросным внесением. С увеличением глубины заделки удобрения с 5 до 7 см отмечена тенденция к увеличению активности корневой системы льна.

Коэффициенты использования элементов питания из удобрения (КИУ), рассчитанные разностным методом, были наиболее высокими при локальном внесении удобрения на глубину 7 см от поверхности почвы и составили: фосфора — 6.0–11.0%, калия — 15.3–25.6% (табл. 2).

Внесение комплексного удобрения в междурядья с расстоянием между лентами 15 см на глубину 7 см от поверхности почвы в дозе 100 кг/га повысило урожайность всего льноволокна на 0.5 ц/га, окупаемость удобрения дополнительным урожаем волокна — на 0.2 кг/кг. При внесении дозы 200 кг/га эффективность была больше: прибавка урожайности составила 1.9 ц/га, окупаемость удобрения повысилась на 1.57 кг/кг в сравнении с разбросным внесением под культивацию. Качество трепаного волокна практически не зависело от способа внесения удобрения.

Использование удобрения в дозе 100 кг/га при локальном внесении было более эффективным, чем разбросное внесение вдвое большей дозы (200 кг/га) и обеспечило повышение коэффициента использования фосфора на 7.6%, калия — на 19.0%, урожайности всего волокна — на 0.6 ц/га.

**Таблица 2.** Сравнительная эффективность разбросного и локального внесения удобрения под лен-долгунец, среднее за 3 года

Вариант	КИУ, %		Урожайность, ц/га		Номер трепаного волокна	Оплата 1 кг д.в. удобрения дополнительным урожаем волокна, кг
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	всего волокна	трепаного		
Без удобрения	—	—	8.6	5.0	10.0	—
100 кг/га, вразброс	7.8	14.2	9.3	5.4	10.0	1.79
100 кг/га, в междурядья через 15 см на глубину 5 см	6.0	13.0	9.3	5.3	9.9	1.79
100 кг/га, в междурядья через 15 см на глубину 7 см	11.0	25.6	9.8	5.4	10.3	1.99
200 кг/га, вразброс	3.4	6.6	9.2	5.2	10.2	0.50
200 кг/га, в междурядья через 15 см на глубину 5 см	3.5	6.1	9.6	5.4	10.2	0.83
200 кг/га, в междурядья через 15 см на глубину 7 см	6.0	15.3	11.1	6.2	10.0	2.07
<i>HCP</i> <sub>05</sub>			0.3	0.2		

В производственных условиях при использовании модернизированной льняной сеялки СЗ–3,6А–0,2 внесение удобрения в междурядья с расстоянием между лентами 15 см на глубину 7 см от поверхности почвы в дозе 200 кг/га увеличило урожайность льносоломой на 0.7 ц/га без изменения его качества. Благодаря совмещению операции посева с внесением удобрения затраты труда снизились на 0.64 чел.-ч/га, ГСМ – на 2.2 кг/га. Биоэнергетическая эффективность увеличилась с 1.7 до 2.6 ед.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, локализация комплексного удобрения при основном внесении под лен-долгунец увеличивала массу и сосушую силу корней, способствовала распределению корневой системы в пахотном горизонте, в результате повышался коэффициент использования фосфора из удобрения на 2.6–3.2, калия – на 8.7–11.4% в сравнении с разбросным способом внесения под культивацию.

При припосевном ленточном внесении комплексного удобрения состава N5P25K30B0.3 наибольшая продуктивность льна-долгунца достигалась при размещении удобрения под семенные рядки и в междурядья с расстоянием между лентами 7.5 см. С увеличением расстояния между лентами до 15 см эффективность локального внесения снижалась, но преимущество перед разбросным внесением сохранялось. Оптимальной

для заделки комплексного удобрения была глубина 7 см от поверхности почвы.

Внесение комплексного удобрения в дозе 200 кг/га в междурядья через 15 см на глубину 7 см от поверхности почвы обеспечивало прибавку урожайности льноволокна в сравнении с разбросным внесением равной дозы под культивацию в размере 1.9 ц/га. Окупаемость удобрения увеличилась на 1.57 кг/кг, биоэнергетическая эффективность – на 0.9 ед. Благодаря совмещению посева льна с внесением удобрения затраты труда снизились на 0.64 чел.-ч/га, расход ГСМ – на 2.2 кг/га.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Перспективная ресурсосберегающая технология производства льна-долгунца: Метод. рекоменд. М.: Росинформагротех, 2008. 68 с.
2. Прудников А.Д., Рыбченко Т.И., Романова И.Н. Адаптивное льноводство: Монография / Под ред. Кучумова А.В. Смоленск: Универсум, 2016. 216 с.
3. Ладонин В.Ф., Гордеев А.М., Гордеев Ю.А. Физико-химический аспект эффективности локального внесения минеральных удобрений // Агрохимия. 2005. № 5. С. 49–54.
4. Лен Беларуси: Монография. Белорусский НИИ льна / Под ред. Голуба И.А. Минск: ЧЦП “Орех”, 2003. 245 с.
5. Тихомирова В.Я., Сорокина О.Ю., Кузьменко Н.Н., Нечушкин С.М. Усовершенствованная система применения удобрений в льняном севообороте: Монография. Торжок, 2005. 81 с.

6. *Ходянкова С.Ф., Кукреш С.П., Анфимова Э.Д.* Энергосберегающая технология применения удобрений под лен-долгунец // *Агрохимия*. 1996. № 11. С. 87–94.
7. Методические указания по проведению полевых опытов со льном-долгунцом. Торжок, 1978. 71 с.
8. *Сорокина О.Ю., Кузьменко Н.Н.* Влияние гидротермических условий периода вегетации на урожайность льна-долгунца на основе данных длительных стационарных опытов // *Современные проблемы опытного дела. Мат-лы Международ. науч.-практ. Конф. 6–9 июня 2000 г. Санкт-Петербург, 2000. С. 251–255.*

## **Efficiency of Application of Complex Fertilizer under of Fibre Flax**

**N. N. Kuzmenko**

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

The optimal parameters of placement in the soil of a complex fertilizer composition N5P25K30B0.3 at pre-planting tape introduction under of fibre flax are determined. The local introduction of complex fertilizers in the dose of 200 kg/ha between rows of 15 cm to a depth of 7 cm from the soil surface compared to broadcast make under cultivation increased activity of the root system, the utilization of phosphorus from fertilizers by 2.6%, potassium – by 8.7%, the yield of flax fiber – 1.9 c/ha. The payback of fertilizer increased by 1.57 kg/kg, the bioenergetic efficiency – by 0.9 units. Due to the combination of flax sowing operation with fertilization, labor costs decreased by 0.64 people-hour/ha, fuel consumption – by 2.2 kg/ha.

*Key words:* fibre flax, complex fertilizer, local application, spacing, depth of sealing.

УДК 631.8:631.582(571.11)

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ УДОБРЕНИЙ В ЗЕРНОПАРОВОМ СЕВООБОРОТЕ В РАЗНЫХ ЗОНАХ КУРГАНСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2020 г. О. В. Волынкина<sup>1,\*</sup>, Ю. В. Суркова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр УрО РАН  
641325 с. Садовое, Кетовский р-н, Курганская обл., ул. Ленина 9, Россия

\*E-mail: [kniish@ketovo.zaoral.ru](mailto:kniish@ketovo.zaoral.ru)

Поступила в редакцию 08.11.2019 г.

После доработки 28.12.2019 г.

Принята к публикации 11.05.2020 г.

Исследовали продуктивность посевов пшеницы в зернопаровых севооборотах в 3-х зонах Курганской обл. Сравнили данные стационарных экспериментов на Шадринском, Центральном и Макушинском опытных полях Курганского НИИСХ. Приведены результаты многолетних наблюдений за накоплением нитратного азота в паровом поле зернопарового севооборота, по этому показателю существенное преимущество было за Макушинским полем. Показана повторяемость разных уровней урожайности пшеницы в неудобренных вариантах и при внесении оптимальных доз удобрений. Общая экономическая оценка зернопарового севооборота была больше для Макушинского поля.

*Ключевые слова:* зоны Курганской обл., зернопаровой севооборот, нитратный азот, урожайность, пшеница.

DOI: 10.31857/S0002188120080128

### ВВЕДЕНИЕ

Паровое поле дает определенные гарантии получения высокой урожайности 1-й культуры после пара и хорошего качества продукции, что более всего определяется достаточно высоким накоплением в пару нитратного азота в 1-метровом слое почвы. При сравнении содержания нитратов в почве в конце парования на разных опытных полях Курганского НИИСХ были обнаружены существенные отличия. Обследования проведены на 4-х опытных полях: Шадринском (север области), Центральном (центральная зона), Южном (юг области) и Макушинском (восточная зона) при ежегодной вспашке. Анализ сделан по наблюдениям в течение от 5-ти до 15–20-ти лет [1]. Результаты показали, что наибольшее накопление нитратного азота в метровом слое (194 кг N-NO<sub>3</sub>/га) характерно для легкого глинистого обыкновенного солонцеватого чернозема на востоке области на Макушинском опытном поле (рис. 1). В тяжелосуглинистом выщелоченном черноземе Шадринского опытного поля в связи с меньшим количеством тепла в северо-западной зоне области в слое 0–100 см почвы накапливалось лишь 85 кг N-NO<sub>3</sub>/га. Промежуточное положение занимали Центральное и Южное опытные поля, где почва – выщелоченный чернозем среднесуглинистый в центре и легкосуглинистый на юге.

Более значимыми становятся различия в питании растений при рассмотрении урожайных данных длительных стационарных экспериментов на опытных полях в 4-польных зернопаровых севооборотах. Проанализировано действие и последствие пара в повышении урожайности мягкой яровой пшеницы на 3-х опытных полях. Известно, что при достаточном накоплении азота под посевом пшеницы после пара эффект пара усиливался улучшением фосфорного питания, поскольку эти два элемента находятся в тесном взаимодействии [2, 3]. Обеспеченность растений подвижным фосфором на Центральном опытном поле низкая (40 мг/кг), на Макушинском – очень низкая (28 мг/кг). Поэтому действие пара существенно усиливалось с применением фосфорного удобрения. На Шадринском опытном поле содержание в почве подвижного фосфора – повышенное (70–75 мг/кг), при таком показателе больше реализация имеющихся запасов азота, но меньше эффективность фосфорного удобрения [5–7]. Именно повышенное количество фосфора в почве Шадринского опытного поля послужило причиной умеренного влияния внесения P30 в посеве 1-й пшеницы после пара и высокой эффективности азота. В силу наименьшего накопления азота в пару на Шадринском опытном поле в посевах 1-й культуры звена севооборота иногда проявлялся эффект от добавления азотного удобрения к фосфорному.

**Таблица 1.** Агрохимическая характеристика почвы 3-х опытных полей Курганского НИИСХ (слой 0–20 см почвы) [4]

Показатель	Опытное поле		
	Шадринское, северо-западная зона области	Центральное, центральная зона области	Макушинское, восточная зона области
Срок проведения опытов	1970–2011 гг.	1969–2018 гг.	1970–2014 гг.
Тип и подтип почвы	Чернозем выщелоченный	Чернозем выщелоченный	Чернозем обыкновенный солонцеватый
Гранулометрический состав	Тяжелый суглинок	Средний суглинок	Легкая глина
Гумус, %	6.14	3.4–3.8	5.0
pH <sub>KCl</sub> *, 1970/2008 гг.	6.2/4.8	6.3/5.1	7.3/8.03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (по Чирикову), мг/кг	70–75	38–40	25–28**
K <sub>2</sub> O (по Чирикову), мг/кг	150–170	212–300	170–185

\*На Макушинском опытном поле – pH<sub>H<sub>2</sub>O</sub>.

\*\*Для Макушинского опытного поля содержание P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (по Мачигину) – 3 мг/100 г.

Цель работы – анализ приемов усиления положительного действия пара на урожайность и качество яровой пшеницы с помощью внесения оптимальных доз удобрений в каждом из 3-х посевов пшеницы зернопарового севооборота.

#### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполнено в Курганском НИИ сельского хозяйства в лаборатории земледелия в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования по направлению 142 Программы ФНИ государственных академий наук по теме № 0773-2019-0027 “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”. Проведен анализ данных стационарных длительных опытов в течение 40–45–50 лет. Опыты заложены В.И. Овсянниковым с помощниками. Исследования вели: на Шадринском поле – В.П. Новоселов, на Макушинском – Г.П. Попов, на Центральном – С.М. Овсянникова и в 2007–2018 гг. – Ю.В. Суркова. Анализ многолетних данных с подготовкой таблиц для сравнительной оценки роли пара в разных зонах Курганской обл. и подбором экономически выгодных приемов удобрения пшеницы, положительно влияющих на урожайность и качество зерна, проведен О.В. Волынкиной и Ю.В. Сурковой.

Рассмотрена урожайность в 4-польном зернопаровом севообороте – пар и 3 пшеницы. Агрохимическая характеристика почвы приведена в табл. 1.

Общая площадь делянки 288 м<sup>2</sup> (7.2 × 40), учетная 80 м<sup>2</sup> (2 × 40). Повторность трехкратная. Учет урожая пшеницы вели напрямую комбайном “Сампо-500” с отбором образца для определения влажности и чистоты бункерной массы зерна.

Окончательную оценку эффективности зернопаровых севооборотов выполнили путем экономической оценки. Тип технологий несколько отличался на разных опытных полях. Например, на основную обработку почвы затраты были одинаковыми на Центральном и Шадринском опытных полях, поскольку данные получены при ежегодной вспашке с весенним боронованием и предпосевной обработкой (1237 + 193 + 588 = 2018 руб./га). На Макушинском поле 30 лет проводили вспашку и 15 лет – поверхностную обработку почвы, средне-взвешенные затраты за 45 лет на основную обработку и сопутствующие ей работы складывались из следующих сумм: 1021 + 193 + 588 = 1802 руб./га. Для 1-й культуры на всех опытных полях добавились расходы на 4 летних культивации в пару (588 руб. × 4). Стоимость семян и посевных работ дисковой сеялкой СЗ-3,6 с прикатыванием равнялась 2862 руб./га. В применении удобрений тоже были особенности. Например, на Центральном опытном поле фосфорный фон поддерживали дозой P30 с 1969 по 1999 гг., далее – последствием суперфосфата. Поэтому средне-взвешенная доза за 50 лет была равна P18. Также поддерживали фосфорный фон и на Макушинском поле: 30 лет применяли P30, после чего использовали последствие фосфорных удобрений, в этом случае в среднем на год за 45 лет вносили P20.

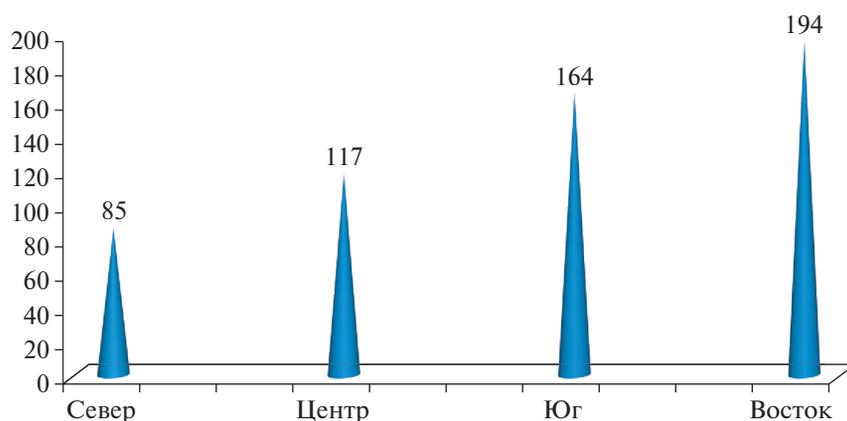


Рис. 1. Накопление N-NO<sub>3</sub> в 1-метровом слое почвы в разных зонах Курганской обл. [1].

Защитные мероприятия большую часть лет представляли применение гербицида 2,4-Д, покупка которого и расходы на опрыскивание составляли 706 руб./га. С распространением злаковых сорняков последние 10 лет применяли баковую смесь из гербицидов против широколистных и злаковых сорняков, затраты с расходами на об-

работку посева составили 1507 руб./га. Средневзвешенные затраты на защиту от сорняков за 50 лет на Центральном опытном поле были равны 866, за 45 лет на Макушинском поле – 884 и за 40 лет на Шадринском поле – 906 руб./га. Уборка пшеницы с доработкой зерна стоила 106 руб./ц, поэтому в зависимости от уровня урожайности

Таблица 2. Варьирование урожайности 1–3-й пшеницы после пара на Центральном опытном поле

Показатель	Контроль без удобрения			P18*		
	Уровень урожайности					
	низкий	средний	высокий	низкий	средний	высокий
1-я культура						
Урожайность, ц/га	10.9	19.1	30.1	11.4	19.1	30.9
Число лет из 50	7	17	26	5	15	30
Доля лет, %	14	34	52	10	30	60
Среднее	23.7			25.4		
2-я культура						
Контроль без удобрения			N40P18			
Урожайность, ц/га	8.9	19.0	28.8	8.2	19.9	30.2
Число лет из 50	17	24	9	14	19	17
Доля лет, %	34	48	18	28	38	34
Среднее	17.3			20.1		
3-я культура						
Контроль без удобрения			N40P18			
Урожайность, ц/га	9.3	16.7	26.1	6.9	19.2	30.0
Число лет из 50	21	24	5	12	26	12
Доля лет, %	42	48	10	24	52	24
Среднее	14.5			18.8		
HCP <sub>05</sub> , ц/га	1-я культура – 1.2–1.5, 2-я культура – 1.9–2.1, 3-я культура – 2.1–2.4					

Примечание. Приняты следующие уровни урожайности: низкий – до 13.7, средний – 13.8–23.7, высокий – 23.8 и более. То же в табл. 3–8.

\*Дозу P30 во всех полях вносили в 1969–1999 гг., далее использовали последствие суперфосфата, в среднем на год за 50 лет – P18. То же в табл. 3.

**Таблица 3.** Варьирование урожайности 1–3-й пшеницы после пара на Макушинском опытном поле

Показатель	Контроль без удобрения			P18*					
	Уровень урожайности								
	низкий	средний	высокий	низкий		средний		высокий	
1-я культура									
Урожайность, ц/га	9.7	20.2	29.3	10.0		19.9		33.1	
Число лет из 50	5	22	18	3		12		30	
Доля лет, %	11	49	40	6		27		67	
Среднее	22.7			28.0					
2-я культура									
	Контроль без удобрения			N20P20			N40P20		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Урожайность, ц/га	10.2	18.1	28.3	9.5	20.4	30.6	9.6	20.1	30.2
Число лет из 50	12	23	10	7	15	23	5	15	25
Доля лет, %	27	51	22	16	33	51	13	31	56
Среднее	18.3			23.9			24.5		
3-я культура									
	Контроль без удобрения			N20P20			N40P20		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Урожайность, ц/га	10.1	18.4	29.5	10.6	18.8	29.2	8.9	17.1	31.3
Число лет из 50	18	22	5	9	15	21	7	16	22
Доля лет, %	40	49	11	20	33	47	15	36	49
Среднее	16.3			22.0			22.8		
<i>HCP</i> <sub>05</sub> , ц/га	1-я культура – 1.9–3.2, 2-я культура – 1.7–3.5, 3-я культура – 2.5–3.7								

Примечание. В графе 1 – низкий, 2 – средний, 3 – высокий уровень урожайности. То же в табл. 4.

сумма этих затрат менялась. Стоимость удобрений (аммофос – 2900, аммиачная селитра – 1600 руб./ц) и зерна пшеницы (3-й класс, 1040 руб./ц) взяты по ценам 2019 г. Цена пшеницы скорректирована по частоте выращивания зерна 3-го класса в каждом из полей севооборота. Детализация расходов на разные технологические операции способствовала обоснованной экономической оценке эффективности пара на каждом из опытных полей.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа изложили сначала отдельно для каждого из опытных полей, а затем полученные оценки сравнили между собой. Очень важно увидеть повторяемость по годам урожая пшеницы разного уровня, а также выявить пути увеличения частоты лет с получением высокой продуктивности зернопарового севооборота. Параллельно были выявлены оптимальные дозы удобрений в каждом из полей севооборота.

*Центральное опытное поле, 50 лет, 1969–2018 гг.* Фосфорное удобрение в посеве 1-й пшеницы по-

сле пара на Центральном опытном поле оказало умеренное положительное действие, повысив число лет с высокой урожайностью зерна (с 26 до 30 ц/га) и увеличив среднюю урожайность на 1.7 ц/га (табл. 2). В следующем поле существенно снижалась обеспеченность растений азотом. В почве под 2-й пшеницей после пара содержание N-NO<sub>3</sub> снижалось почти в 2 раза по сравнению с 1-й пшеницей после пара (рис. 1) [1]. Поэтому положительно действовало азотно-фосфорное удобрение. За счет оптимальной дозы N40P30 число лет с высокими урожаями увеличилось с 9 до 17, а с низкими – снизилось с 17 до 14.

В конце севооборота применение азотно-фосфорного удобрения было уместно в той же дозе N40, т.к. среди испытанных в опыте доз N20–40–60 минимальная доза была менее эффективной, особенно по влиянию на качество зерна, а доза N60 не обеспечивала стабильно существенного прироста урожая. На удобренном фоне в этом поле заметно снижалось число лет с низкими урожаями – с 21 года до 12 лет (табл. 2).

*Макушинское опытное поле, 45 лет, 1970–2014 гг.* На Макушинском опытном поле с лучшим азот-

**Таблица 4.** Варьирование урожайности 1–3-й пшеницы после пара на Шадринском опытном поле

Показатель	Контроль без удобрения			P30			N40P30		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1-я культура									
Урожайность, ц/га	9.6	19.1	32.1	10.2	19.4	32.6	9.9	20.2	34.1
Число лет из 50	4	16	20	3	14	23	3	12	25
Доля лет, %	10	40	50	7.5	35	57.5	7.5	30	62.5
Среднее	24.6			26.3			28.1*		
2-я культура									
	Контроль без удобрения			N40P20			N80P20		
Урожайность, ц/га	10.3	18.7	28.3	11.4	18.4	31.6	10.5	18.4	33.3
Число лет из 50	14	21	5	4	12	24	3	8	29
Доля лет, %	35	52.5	12.5	10	30	60	7.5	20	72.5
Среднее	17.0			25.6			28.6**		
3-я культура									
	Контроль без удобрения			N40P20			N80P20		
Урожайность, ц/га	10.4	18.1	27.6	11.3	18.8	31.7	12.0	18.1	33.4
Число лет из 50	15	23	2	4	11	25	5	11	24
Доля лет, %	37.5	57.5	5	10	27.5	62.5	12.5	27.5	60
Среднее	15.7			26.1			26.6***		
HCP <sub>05</sub> , ц/га	1-я культура – 1.5–3.2, 2-я культура – 3.1–3.5, 3-я культура – 2.9–3.4								

\*В течение 14 лет из 40 лет прирост урожайности от добавления N40 к P30 в посеве 1-й пшеницы после пара менялся от 2 до 6 ц/га (в 1980 г. – 10.2 ц/га), в среднем за эти 14 лет – 4.3 ц/га.

\*\* За 40-летний период 25 раз прибавки урожайности при применении N80P30 были намного больше, чем при внесении N40P30.

\*\*\* Удвоение дозы азота давало дополнительную прибавку урожайности (2.0–8.0 ц/га) лишь 5 раз.

ным режимом обыкновенного солонцеватого чернозема и очень низким содержанием подвижного фосфора применение дозы P20 обеспечило высокий эффект. Среднее повышение урожайности 1-й пшеницы после пара составило 5.3 ц/га. Еще более высокие приросты урожайности в 6–14 ц/га отмечены 21 раз за 45 лет опыта (табл. 3).

При удалении по времени посева пшеницы от пара наряду с фосфором повышалась потребность в азоте. Действие доз N20–40 на изменение урожайности на этом опытном поле показало целесообразность применения дозы N20. В посеве 2-й пшеницы после пара на фоне применения N20P30 существенно менялось число лет с высокой урожайностью. Оно повышалось с 10 лет в контроле до 23 в опыте. Низкие урожаи отмечены всего 7 раз при 12-ти в контроле. Удвоение дозы азота внесло только небольшие изменения, что и позволило считать дозу удобрения N20P20 оптимальной для обыкновенного солонцеватого чернозема в посеве 2-й пшеницы после пара.

В конце севооборота удобрение N20P20 было еще эффективнее: число лет с высокими урожаями пшеницы увеличилось с 5-ти лет до 21-го года,

а с низкими – уменьшилось с 18-ти до 9-ти лет. Закономерность действия доз удобрения оказалась одинаковой в посевах 2-й и 3-й пшеницы после пара. Удвоение дозы азота повысило среднюю урожайность всего на 0.8 ц/га – с 22.0 до 22.8 (табл. 3).

*Шадринское опытное поле, 40 лет, 1972–2011 гг.*  
Подход к выбору изученных доз азота в северо-западной зоне Курганской обл. основывался на учете лучших условий увлажнения. В связи с более высоким содержанием подвижного фосфора в почве и самым низким накоплением нитратного азота в пару на Шадринском опытном поле, оптимальный состав удобрения в посеве 1-й пшеницы после пара отличался от других опытных полей. В этом случае добавление азота к фосфору под 1-ю пшеницу после пара было эффективным: прибавка урожайности возрастала на 2 ц/га и более 15 раз за 40 лет, содержание клейковины в зерне – 18 раз. Поэтому средняя урожайность 1-й пшеницы после пара от добавления азота к фосфору повысилась почти на 2 ц/га. Урожайность в вариантах P30 и N40P30 составила 26.3 и 28.1 при 24.6 ц/га в контроле (табл. 4). Конечно, рекомен-

**Таблица 5.** Урожайность пшеницы в зернопаровом севообороте при оптимальных дозах удобрений, ц/га

Поле после пара/Опытное поле	1-е	2-е	3-е	Суммарный сбор зерна
Центральное	P30 25.4	N40P18 20.1	N40P18 18.8	64.3
Макушинское	P30 27.7	N20P20 23.9	N20P20 22.0	73.6
Шадринское	P30 28.1	N80P30 28.6	N40P30 26.1	82.8

дация применять азотное удобрение под 1-ю пшеницу после пара не может быть повсеместной. Однако в хозяйствах с применением интенсивных технологий это вполне возможно.

Действие удобрений N40P30 и N80P30 сравнивали в посеве 2-й пшеницы после пара. За 40-летний период 25 раз прибавки урожайности при применении N80P30 были намного больше, чем при дозе N40P30, что сказалось на повторяемости высокой урожайности пшеницы (29 лет) при 5-летней в контроле и 24-летней при дозе N80. При частом проявлении преимущества более высокой дозы азота средняя урожайность пшеницы оказалась на 3 ц/га больше, чем в варианте N40P30. Удвоенная доза азота на фоне фосфора обеспечила среднюю прибавку урожайности к контролю, равную 11.6 ц/га. Поскольку шаг изменения дозы азота в опыте был большим, то оптимальная рекомендованная доза удобрений для Шадринского опытного поля могла меняться в пределах N50–60–70–80.

В заключительном поле севооборота удвоенная доза азота не показала такого же эффекта, как в посеве 2-й пшеницы после пара. Удвоение дозы

азота дало дополнительную прибавку только 5 раз за 40 лет. Удобрение N40P30 обеспечило прирост урожайности 10.4 ц/га, увеличив частоту лет с высокой урожайностью с 2-х лет в контроле до 25-ти лет. Пониженная урожайность за счет применения удобрения повторилась всего 4 раза вместо 15-ти в неудобренном варианте.

Сравнили на примере 3-х опытных полей экономические показатели для интенсивных технологий возделывания пшеницы с применением оптимальных доз удобрений. Суммарный сбор зерна в севообороте на опытных полях был равен 64.3, 73.9, 82.8 ц/га соответственно (табл. 5).

Наблюдения за качеством зерна пшеницы в разных полях севооборота и на 3-х опытных полях позволили корректировать цену зерна. Например, в северо-западной зоне Курганской обл. (Шадринское опытное поле) сложнее всего вырастить качественную пшеницу. Согласно повторяемости урожайности 3-го класса пшеницы, выведена средневзвешенная стоимость зерна на основе цен 2019 г. (табл. 6). При благоприятных ценах на зерно пшеницы 3- и 4-го классов, установившихся осенью 2019 г. в Уральском регионе, средневзвешенная цена 1 ц зерна пшеницы, несмотря на различную повторяемость качества зерна в соответствии с требованиями к 3-му классу, менялась в небольших пределах.

За счет внесения оптимальных доз удобрений стоимость урожая была близкой для полей севооборота заметнее всего на Шадринском опытном поле. Это выравнивание достигалось применением во 2-м поле повышенной дозы удобрения N80P30, поэтому одинаковой прибыли в 1- и 3-м полях севооборота не получили (табл. 7). Показатели изменились бы в лучшую сторону, если бы вносили дозы порядка N65–70, которые могли оказать близкое к дозе N80 влияние. В более

**Таблица 6.** Формирование цены пшеницы с учетом повторяемости качества зерна 3-го класса на основе цен 2019 г.\*

Поле после пара/Опытное поле	1-е	2-е	3-е	1-е	2-е	3-е
	Частота получения зерна 3-го класса, % лет			Средневзвешенная цена, руб./ц		
Центральное (50 лет)	P18 94*	N40P18 93	N40P18 93	P18 1035	N40P18 1033	N40P18 1033
Макушинское (45 лет)	P30 100	N20P 80	N20P 67**	P20 1040	N20P20 1022	N20P20 1010
Шадринское (40 лет)	P30 86	N80P30 93	N40P30 86	P30 1026	N80P30 1033	N40P30 1026

\*Цена 3-го класса – 1040, 4-го – 950 руб./ц.

\*\*В посеве 1-й пшеницы после пара уменьшение показателя вызвано сильным распространением стеблевой ржавчины в 2015–2016 гг.

**Таблица 7.** Экономические оценки применения удобрений в 1–3-м полях зернопарового севооборота при интенсивной технологии возделывания пшеницы

Поле после пара/Опытное поле	1-е	2-е	3-е	1-е	2-е	3-е
	Средневзвешенная цена зерна, руб./ц			Сумма от продажи пшеницы, руб./га		
Центральное	1035	1033	1033	26289	20763	19420
Макушинское	1040	1022	1004	29120	24426	22220
Шадринское	1026	1033	1026	28831	29544	26779
	Затраты на технологию			Прибыль		
Центральное	12487	12170	12008	13802	8593	7412
Макушинское	12692	11652	11414	16428	12774	10806
Шадринское	13560	15783	13656	15271	13761	13123

поздних закладках опытов шаг изменения исследованных доз был равен N20.

Суммы затрат и прибыли в целом в севообороте свидетельствовали о наиболее высокой рентабельности выращивания пшеницы в зернопаровом севообороте на Макушинском опытном поле (табл. 8). Этот результат экономической оценки зернопарового севооборота среди 3-х зон Курганской обл. согласуется с преимуществом в накоплении нитратного азота в почве пара на этом опытном поле. В этом случае природный ресурс обеспечивал не только высокую урожайность 1-й пшеницы после пара, но и позволил в следующих полях севооборота обходиться меньшей дозой азота (N20). В почве этого опытного поля повышенное количество нитратов с более высоким эффектом реализовалось в урожае с помощью фосфорного удобрения, поскольку почва была беднее подвижным фосфором.

Показано наименьшее влияние пара в северо-западной зоне области, т.к. по данным Шадринского поля, даже в посеве 1-й пшеницы после пара добавление азота к фосфору было эффективным. В этой зоне есть хозяйства, где практикуют на определенной части пашни беспаровое земледелие.

**Таблица 8.** Общая экономическая оценка зернопарового севооборота при применении интенсивной технологии в разных зонах Курганской обл.

Опытное поле	Затраты в 3-х полях севооборота, руб./га	Сумма прибыли в севообороте, руб./га	Рентабельность, %
Центральное	36665	29807	81
Макушинское	35758	40008	112
Шадринское	42999	42155	98

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ уровня урожайности пшеницы в 3-х полях 4-польного зернопарового севооборота выявил ее различия в зависимости от полей севооборота и 3-х зон Курганской обл. Уровень урожайности в 1-м посеве после пара на Центральном опытном поле при содержании  $P_2O_5$  в почве 40–50 мг/кг умеренно менялся от применения фосфора в средней в опыте дозе P18. За счет удобрения число лет с повышенной урожайностью 1-й пшеницы после пара возрастало с 26-ти в контроле до 30-ти, а с низкой – уменьшалось с 7-ми до 5-ти лет. На Макушинском опытном поле при стабильном положительном действии фосфора в посеве 1-й пшеницы после пара высокая урожайность отмечена 30 раз за 45 лет при 18-ти в контроле. Средняя урожайность на фоне P20 выявлена 12 раз при 22-х в контроле. На Шадринском опытном поле с лучшей влагообеспеченностью растений и в контроле урожайность в 1-м посеве после пара была достаточно высокой при повторяемости этого показателя в 50% лет. При внесении P30 получен близкий результат. Проверена целесообразность добавления азота к фосфору в 1-м поле после пара, что было эффективно в большей части лет, что позволило рекомендовать этот прием для применения в развитых хозяйствах, т.к. среднее дополнительное повышение урожайности на фоне N40P30 достигало 2 ц/га. Такой прием действовал положительно и на качество зерна.

Показано, что во 2-м посеве после пара на всех опытных полях требовалось внесение азотно-фосфорного удобрения при разных дозах азота. На Центральном опытном поле доза N40P18 обеспечила высокую урожайность пшеницы 17 раз за 50 лет при 9-ти в контроле. На Макушинском опытном поле на фоне N20P20 высокая урожайность за 45 лет получена 23 раза при кон-

трольном показателе 10 раз. На Шадринском опытном поле доза N80P30 позволила получить высокую урожайность 29 раз за 40 лет, тогда как в контроле лишь 5 раз. Повышение дозы азота до N80 в сочетании с P30 во 2-м посеве в северо-западной зоне было оправдано, т.к. этот прием увеличил прибавку урожайности по отношению к дозе N40P30 в среднем на 3 ц/га.

В конце севооборота урожайность пшеницы в контроле резко снижалась. На Центральном опытном поле доза N40P18 снизила частоту низкой урожайности с 21-го года до 12-ти лет, на Макушинском опытном поле доза N20P20 – с 18-ти до 9-ти лет, на Шадринском опытном поле при оптимальной дозе N40P30 – с 15-ти до 4-х лет. Высокая урожайность пшеницы за счет интенсификации технологии соответственно в опытных полях в 3-м посеве после пара повторилась 12, 21, 25 раз при 5, 5, 2 раза в контроле.

Применение удобрений существенно меняло не только урожайность пшеницы в зернопаровом севообороте, но и качество зерна. Выращивание ценной пшеницы (3-го класса) удавалось в 1-м поле после пара в 86–100% лет, а в следующих посевах, даже в удобренных вариантах – реже. С удалением посева от пара ухудшались условия азотного питания, что снижало белковость зерна. Кроме этого, в 3-м и 4-м полях севооборота качество пшеницы сильнее зависело от погоды. Удобрением не всегда удавалось преодолеть влияние неблагоприятных погодных условий.

В экспериментах Курганского НИИСХ рентабельность выращивания пшеницы в зернопаровом севообороте была больше на Макушинском опытном поле. Такой результат был обеспечен за счет наибольшего накопления нитратного азота в пару в обыкновенном солонцеватом черноземе

восточной зоны области и высоким действием фосфорного удобрения в этой почве, бедной подвижными фосфатами. Наименьшее значение имел пар в северо-западной зоне области, поскольку, по данным Шадринского поля, даже в 1-м поле после пара пшеница положительно реагировала на добавление к фосфору азота. В этой зоне практикуется на определенной части пашни беспаровое земледелие.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Никитишен В.И., Личко В.И.* Взаимосвязи в минеральном питании ячменя при длительном применении удобрений на серой лесной почве ополья // *Агрохимия*. 2014. № 10. С. 45–52.
2. *Волынкин В.И., Волынкина О.В.* Взаимодействие азота и фосфора в удобрении мягкой яровой пшеницы при технологии бесменного возделывания и оставления соломы на поле // *Агрохимия*. 2018. № 3. С. 34–42.
3. Система земледелия Курганской области. Новосибирск: СО ВАСХНИЛ, 1988. 216 с.
4. Длительные стационарные опыты КНИИЗХ по изучению вопросов земледелия (агрохимии, земледелия, семеноводства, кормопроизводства). Аннот. сб. рекоменд. Курган, 1986. 115 с.
5. *Вислобокова Л.Н., Скорочкин Ю.П., Иванова О.М.* Эффективность удобрений под озимую пшеницу в зависимости от содержания фосфора в почве // *Матлы 44-й Международ. научн. конф. молодых ученых и специалистов*. М.: ВНИИА, 2010. С. 39–40.
6. *Шафран С.А.* Влияние типа почв и содержания в них подвижных фосфатов на эффективность фосфорных удобрений // *Агрохимия*. 2015. № 3. С. 26–33.
7. *Чуб М.П., Пронько В.В., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф., Журавлев Д.Ю.* Оптимизация доз азотных и фосфорных удобрений на черноземных почвах Поволжья с различным содержанием фосфора // *Плодородие*. 2017. № 2. С. 8–11.

## Action and Aftereffect of Steam in Different Zones of Kurgan Region

O. V. Volynkina<sup>a, #</sup> and Yu. V. Surkova<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Urals Branch of RAS  
Ekaterinburg ul. Lenina 9, Ketovsky district, Kurgan region, s. Sadovoye 641325, Russia

<sup>#</sup>E-mail: [kniish@ketovo.zaural.ru](mailto:kniish@ketovo.zaural.ru)

The article investigates the productivity of grain-fallow crop rotations in three zones of the Kurgan region. Data of stationary experiments on Shadrinsky, Central and Makushinsky experimental fields of Kurgan NIISH were compared. Long-term observations of the accumulation of nitrate nitrogen in the fallow field are given, according to this indicator, the Makushinsky field has a significant advantage. The repeatability of different levels of wheat yield on unfertilized plots and at application of optimal doses of fertilizers was shown. The overall economic evaluation of grain-fallow crop rotation from three experimental fields of the Kurgan NIISH is higher in Makushinsky.

*Key words:* three zones of Kurgan region, grain-fallow crop rotation, nitrate nitrogen, wheat, yield

УДК 631.8:635.25ë

## АГРОХИМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УДОБРИТЕЛЬНОЙ КОМПОЗИЦИИ НА ПОСЕВАХ ЛУКА

© 2020 г. С. Усманов<sup>1</sup>, Г. Т. Омарова<sup>1,\*</sup>, О. В. Мячина<sup>2</sup>, Ш. Байбашаева<sup>1</sup>,  
Э. Н. Рамазанова<sup>1</sup>, Г. К. Зулпанова<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт химических наук им. А.Б. Бектурова  
050010 Алматы, ул. Ш. Уалиханова, 106, Республика Казахстан

<sup>2</sup> Институт общей и неорганической химии АН РУз  
100170 Ташкент, ул. Мирзо Улугбека, 77а, Республика Узбекистан

<sup>3</sup> ТОО “Научно-производственное объединение “Ана Жер”  
050040 Алматы, микр-н “Коктем 1”, 26, кв. 72, Республика Казахстан

\*E-mail: gtomarova@gmail.com

Поступила в редакцию 05.11.2019 г.

После доработки 08.01.2020 г.

Принята к публикации 11.01.2020 г.

Использование новой удобрительной композиции на посевах лука в светлом сероземе увеличивало содержание гумуса на 5.6–2.8%, подвижных форм N, P и K – на 27–17, 53–50, 2.7–1.5%, усиливало вынос растениями N, P и K на 19.5–18.3, 7.4–5.9, 4.5–3.6% соответственно. Отмечено изменение численности почвенных микроорганизмов различных эколого-трофических групп: увеличение количества свободноживущих азотфиксаторов в 2.2–3.6 раза, фосфатмобилизирующих микроорганизмов – в 2.2–3.5 раза, аммонифицирующих бактерий в 1.2–2.3 раза. Выявлено снижение числа олиготрофов в 1.5–1.6 раза и денитрификаторов в 2.5–2.7 раза. Показана высокая степень зависимости выноса макроэлементов растениями и уровня урожайности лука от содержания гумуса и NPK в почве.

**Ключевые слова:** агрохимическая эффективность, удобрительная композиция, хлорофилл-белковый экстракт, посева лука.

**DOI:** 10.31857/S0002188120080116

### ВВЕДЕНИЕ

Почва представляет собой химически и биологически разнообразную, активную многокомпонентную среду. Уровень ее плодородия определяется в значительной степени интенсивностью и направленностью биологических процессов, регулирование которых довольно трудно [1]. Орошаемые сероземы юга Казахстана (типичные, светлые) представляют собой хорошую среду для жизнедеятельности микроорганизмов, количественные и качественные изменения которых тесно связаны с трофическим режимом и с условиями питания растений [2, 3]. Определение микробиологических процессов, оказывающих существенное влияние на рост и развитие растений, а также содержание отдельных питательных элементов в почве, является важной задачей. Решение ее позволит регулировать направленность почвообразовательных процессов в сторону повышения почвенного плодородия и эффективности удобрений [4].

Значительным резервом увеличения урожайности сельскохозяйственных культур, повышения качества продукции, устойчивости к неблагоприятным условиям являются регуляторы роста, которые позволяют получить высококачественную продукцию с минимальными затратами на их производство при одновременном сохранении, улучшении плодородия почв, и без изменения агротехники [5–8].

Например, в настоящее время только в Российской Федерации применяют 91 торговое наименование различных стимуляторов роста растений. Наиболее популярны препараты на основе гиббереллиновых и гуминовых кислот, пара-аминобензойной кислоты, индолилуксусной кислоты, индолил-3-масляной кислоты, пиколиновой кислоты, отличительной чертой которых является способность к стимуляции корнеобразования. Весьма перспективны полифункциональные стимуляторы, как препарат зеребра Агро (на основе коллоидного серебра), препарат мелафен и другие, обладающие широким спектром действия.

В сочетании с традиционными агротехническими приемами применение стимуляторов роста, иммунорегуляторов, активаторов полезной микрофлоры, биоудобрений и др., вносимых в малых или сверхмалых дозах, обеспечивает стимуляцию иммунитета растений, ускорение метаболизма и активацию синтеза белков, улучшает качество готовой продукции при росте урожайности [9, 10].

Таким образом, минеральные и органические удобрения, регуляторы роста растений, пестициды и другие виды антропогенной нагрузки играют роль важного экологического фактора, изменяющего как питательный режим растений, так и микробиологические процессы [11–13]. Сведения о численности и активности жизнедеятельности микроорганизмов в сочетании с определением агрохимических характеристик дают основание для разработки агротехнических приемов по управлению биологическими свойствами почвы, особенно малогумусных, и открывают широкие перспективы управления их плодородием [14–17].

Эффективность использования азотных удобрений невелика: в почве используется до 50% внесенного с удобрениями азота, причем ключевую роль играет также микробная активность – повышение численности денитрификаторов. В результате этого снижается коэффициент использования минеральных азотных удобрений, что может привести к загрязнению атмосферы, а также поверхностных и грунтовых вод [18].

Большое влияние на азотный режим почв оказывают азотфиксирующие бактерии. Свободноживущие азотфиксаторы, которые в почвах довольно широко распространены, вместе с симбиотическими клубеньковыми бактериями усваивают атмосферный азот и играют важную роль в поддержании азотного режима почв. Клубеньковые бактерии в значительной мере обеспечивают азотное питание бобовых культур [19].

Минерализация органических фосфорных соединений, превращения фосфатов алюминия, железа, трехкальциевых фосфатов в почве осуществляются микроорганизмами, так же, как и трансформация серы, железа и других элементов. В почве практически нет процесса, в котором микроорганизмы не принимали бы активного участия.

В связи с вышеизложенным, для орошаемых сероземных малогумусных почв наиболее целесообразным представляется применение биоудобрений, стимуляторов роста растений микробного или растительного происхождения, обладающих

высокой агрохимической эффективностью без негативного влияния на структуру микробных сообществ и их активность.

В АО “Институт химических наук им. А.Б. Бектурова” разработана удобрительная композиция с введенным в ее состав стимулятором роста многофункционального действия для обеспечения сельскохозяйственных культур полноценным сбалансированным NP-питанием.

Исходя из вышеизложенного, целью работы было:

– в модельном опыте исследовать влияние удобрительной композиции (**УК**) на основе аммиачной селитры, фосфоритной муки ( $P_{\phi}$ ), хлорофилл-белкового экстракта растения *Juniperus* на содержание подвижных форм азота, фосфора, калия, а также гумуса в почве, определить численность микроорганизмов эколого-трофических групп (**ЭКТГМ**) в светлом сероземе;

– в полевом опыте на посевах лука (2016–2018 гг.) изучить влияние удобрительной композиции на содержание подвижных форм азота, фосфора, калия и гумуса в почве; на рост и развитие растений, урожайность культуры, накопление макроэлементов растениями, а также состав микробных сообществ светло-сероземной почвы;

– исследовать эффективность нового ростстимулирующего биопрепарата, состоящего из хлорофилл-белкового экстракта (**ХБЭ**) растений рода *Juniperus* и сульфата железа, а также удобрительной композиции на основе фосфоритной муки (28%  $P_2O_5$ ), аммиачной селитры и ХБЭ с сульфатом железа.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проведения исследования использовали удобрительную композицию, полученную на основе фосфоритной муки Каратау (месторождения Кок-Джон участка Аралтобе), содержащей 28%  $P_2O_5$ , аммиачной селитры (ГОСТ 2–85), хлорофилл-белкового экстракта растения рода *Juniperus* (know-how ТОО “Хазрат-Али-Акбар”), обогашенного сульфатом железа (ГОСТ 4148–78).

Удобрительную композицию получали при массовом отношении  $N : P_2O_5 = 1 : 0.5$ ,  $N - 23.0$  мас. %,  $P_2O_5 - 11.7$  мас. % и ХБЭ – 0.115 мас. %.

Для проведения модельного опыта использовали светлый серозем, образцы почвы отбирали из пахотного горизонта участка, на котором впоследствии был проведен полевой опыт. Образец включал небольшое количество растительных остатков. Содержание питательных элементов

Таблица 1. Схема полевого опыта при возделывании лука

Вариант	Фаза развития растений	Количество внесенных удобрений, кг/га			
		N <sub>aa</sub>	АФ	K <sub>x</sub>	УК*
1. Контроль	3–4 настоящих листьев	–	–	–	–
	6–7 настоящих листьев	–	–	–	–
	начало образования луковиц	–	–	–	–
2. Эталон N100P50K30	3–4 настоящих листьев	63	28	11.8	–
	6–7 настоящих листьев	103	43	18.8	–
	начало образования луковиц	87	37	16.4	–
3. УК + K30	3–4 настоящих листьев	–	–	11.8	108
	6–7 настоящих листьев	–	–	18.8	174
	начало образования луковиц	–	–	16.4	152
4. 0.5 УК + K15	3–4 настоящих листьев	–	–	5.9	54.1
	6–7 настоящих листьев	–	–	9.4	87.1
	начало образования луковиц	–	–	8.2	76.1

\*УК – удобрительная композиция. То же в табл. 3–7.

(подвижных форм): N – 21.7, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 14.9, K<sub>2</sub>O – 210 мг/кг, гумус – 1.02%.

Модельный опыт проводили по схеме, варианты: 1 – контроль (почва без удобрений), 2 – эталон (почва + N<sub>88</sub>P<sub>50</sub>K<sub>30</sub> (в виде аммиачной селитры, аммофоса и хлорида калия)), 3 – почва + УК (N<sub>100</sub>P<sub>50</sub>+ХБЭ 0.5) + K<sub>30</sub>, 4 – почва + 0.5УК (N<sub>50</sub>P<sub>25</sub> + ХБЭ 0.25)) + K<sub>15</sub>.

В эталонном варианте количество азота выравнивалось до 100 кг/га за счет азота, содержащегося в аммофосе.

Почву, пропущенную через сито 3 мм, по 2 кг (в пересчете на абсолютно сухую) помещали в пластиковые емкости, оборудованные дренажными трубками, инкубировали в течение 30 сут при температуре 23–25°C и постоянной влажности почвы 17 мас. % (50% ПВ), контроль влажности осуществляли каждые 3-е сут.

Анализ почвы на содержание питательных элементов и гумуса проводили через каждые 10 сут опыта, микробиологические исследования (определение ЭКТГМ) – по истечении 30 сут.

Полевой опыт на светлом сероземе заложен по методикам [20] (табл. 1), варианты: 1 – контроль без удобрений; 2 – удобрения в виде N<sub>aa</sub>, АФ и K<sub>x</sub> вносили из расчета N100, P50, K30; 3 – готовую удобрительную композицию (УК) вносили в количестве 435 кг/га из расчета N100, P50, K30; 4 – УК 217.5 кг/га из расчета N50, P25, K15. Количество ХБЭ в вариантах 3 и 4 составляло 0.5 и 0.25 кг/га соответственно.

Удобрения и удобрительную композицию вносили следующим образом: 25% – перед поли-

вом в фазе 3–4 настоящих листьев, 40% – в фазе 6–7 настоящих листьев, 35% – в фазе начала образования луковиц. Почва – светлый серозем (Calcisols [21]). Calcisols ранее называли Desert soils. Большинство из них соответствует Calcids (США) и Calcarosols (Австралия). На почвенной карте Мира (FAO–UNESCO, 1971–1981) эти почвы относятся в основном к Xerosols (Calcic или Naplic) и, в меньшей степени, к Yermosols. Почвообразующие породы в основном аллювиальные, коллювиальные и эоловые отложения богатых основаниями продуктов выветривания. Ландшафты: рельеф – ровный или холмистый; климат – аридный или семиаридный; естественная растительность – редкая, преобладают ксерофитные кустарники и деревья и/или эфемерные злаки и разнотравье. Развитие профиля: у типичных Calcisols формируется палевый (светло-коричневый) верхний горизонт; существенное накопление вторичных карбонатов происходит в пределах 100 см от дневной поверхности.

Среднее содержание питательных элементов (подвижных форм): N – 25.4, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 13.2, K<sub>2</sub>O – 209 мг/кг, гумус – 1.08%.

Общая площадь делянки опыта составила 720 м<sup>2</sup>, размер учетной делянки – 60 м<sup>2</sup>. Повторность – трехкратная, размещение в один ярус. Была проведена основная вспашка опытного участка, боронование с внесением удобрений, вслед за ним проведено двукратное чизелевание. В течение вегетации проведены 3 ручные прополки. Учеты полевой всхожести, роста и развития растений,

**Таблица 2.** Содержание гумуса, подвижных форм азота и фосфора в почве модельного опыта

Варианты	N			P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>			Гумус, %
	мг/кг						
	время от начала опыта, сут						
	10	20	30	10	20	30	30
1. Контроль	21.7	21.7	21.7	14.9	14.9	14.7	1.02
2. Эталон N88P50K50	21.8	21.2	21.0	15.2	15.3	15.5	0.99
3. УК + K30	23.5	26.2	27.8	17.2	18.7	20.0	1.10
4. 0.5 УК + K15	22.0	24.1	25.1	15.9	17.2	19.1	1.07
Стандартное отклонение	0.8	2.3	3.2	1.0	1.8	2.6	0.50
Доверительный интервал	0.8	2.3	3.1	1.0	1.7	2.6	0.05

урожая проводили по методике полевых опытов [20].

Использовали семена лука сорта Каратал. Свойства сорта: вегетационный период – 75–97 сут, урожайность – 200–440 ц/га, крупность головки – 50–120 г, луковица – плотная, округлая, сухие чешуи – желтые и золотисто-желтые, сочные – белые, вкус у лука полуострый, вызреваемость перед уборкой – 35–100%, лежкость хорошая – 65–80%.

Содержание гумуса определяли по Тюрину, подвижных форм азота – по Корнфилду (в модификации ЦИНАО), общего азота – по Кьельдалю, валовых форм фосфора – по Гинзбург, подвижных форм фосфора и калия – по Мачигину в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26205) [22].

Количественный учет отдельных физиологических групп микроорганизмов проводили методом предельных разведений с последующим высевом на различные твердые и жидкие питательные среды [23, 24]: численность азотфиксаторов – на среде Федорова с микроэлементами, фосфатмобилизирующих бактерий – на среде Пиковской, аммонифицирующих микроорганизмов – на мясо-пептонном агаре, олиготрофных микроорганизмов – на почвенном агаре, денитрификаторов – на жидкой среде Гильтая, повторность трехкратная. Численность микроорганизмов выражали в млн КОЕ или млн клеток/г сухой почвы.

Статистический анализ полученных данных проводили с помощью статистических программ “STATISTICA 10.0” и “Office Excel”, с подсчетом стандартного отклонения и доверительного интервала при  $p = 0.05$  [25].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты определения динамики содержания питательных элементов и гумуса в почве модельного опыта приведены в табл. 2. Установлено, что в контрольной почве без удобрения было стабильное содержание подвижных форм азота (21.65–21.70 мг/кг) и фосфора (14.7–14.9 мг/кг) в течение 30 сут, тогда как в эталонном варианте с удобрениями отмечено некоторое снижение содержания подвижных форм азота, незначительное увеличение содержания подвижного фосфора и снижение содержания гумуса почвы на 0.03%.

В вариантах с применением полной дозы УК и 0.5 УК в течение инкубации выявлено достоверное увеличение содержания подвижных форм азота (на 30-е сут – на 28.2 и 15.8%) и фосфора (на 30-е сут – на 36.1 и 29.9%) при небольшом, но также достоверном (судя по доверительному интервалу) приросте количества гумуса (на 7.8 и 4.9% соответственно).

Изучение количества почвенных микроорганизмов в почве на 30-е сут модельного опыта (табл. 3) показало значительное их увеличение под воздействием удобрений. Например, при внесении азотных и фосфорных удобрений в эталонном варианте отмечен прирост числа азотфиксирующих микроорганизмов на 7.1, фосфатмобилизирующих – на 8.3, аммонифицирующих – на 6.7%, тогда как олиготрофов – в 1.5 раза, денитрифицирующих – в 2.5 раза. При внесении УК и 0.5 УК выявлена иная закономерность – установлено значительное увеличение количества азотфиксаторов – в 3.6 и 2.8 раза, фосфатмобилизаторов – в 3.5 и 2.2 раза, аммонификаторов – в 1.6 и 1.2 раза по сравнению с контролем.

Корреляционный анализ позволил установить, что снижение содержания подвижного азота и гумуса в эталонном варианте могло быть связано с увеличением численности денитрификаторов, участвующих в трансформации азота почвы ( $r = -0.61$  и  $-0.75$  соответственно) и олиготрофов, минерализующих гумус, ( $r = -0.74$  и  $-0.85$  соответственно). Тесная прямая корреляция отмечена также между количеством аммонификаторов и содержанием подвижных форм азота, накопленного в почве к концу инкубации. Та же закономерность отмечена при обнаружении связей между числом свободноживущих азотфиксаторов и содержанием подвижного азота. Следует отметить высокую степень зависимости содержания подвижного фосфора и количества фосфатмобилизаторов в почве ( $r = 0.98$ ).

Исследование агрохимической эффективности УК проводили также в полевом опыте на по-

**Таблица 3.** Влияние удобрительной композиции на численность почвенных микроорганизмов (модельный опыт)

Вариант	Численность почвенных микроорганизмов, млн КОЕ/г почвы				
	азотфиксирующие	фосфатмобилизирующие	аммонифицирующие	олиготрофы	денитрификаторы
1. Контроль	0.42	0.60	0.75	8.3	6.5
2. Эталон N88P50K30	0.45	0.65	0.80	12.5	16.5
3. УК + K30	1.52	2.11	1.22	7.2	6.5
4. 0.5 УК + K15	1.20	1.30	0.91	8.1	6.5
Стандартное отклонение	0.55	0.71	0.21	2.4	5.0
Доверительный интервал	0.54	0.69	0.21	2.3	4.0

**Таблица 4.** Влияние удобрительной композиции на показатели высоты главного стебля лука, количества и сохранности растений (полевой опыт)

Вариант	Высота главного стебля, см			Количество растений на 25 августа, тыс. шт./га	Сохранность растений, %
	фаза 3–4 настоящих листьев, 25 мая	фаза 7–9 настоящих листьев, 20 июля	25 августа		
1. Контроль	3.9	22.5	30.1	447	82
2. Эталон N88P50K30	4.3	24.2	32.4	489	86
3. УК + K30	5.1	27.5	35.6	549	93
4. 0.5 УК + K15	4.5	26.1	33.3	522	90
Стандартное отклонение	0.5	2.2	2.3	44	5
Доверительный интервал	0.5	2.1	2.2	43	5

севах лука, выращиваемом на светлом сероземе. Показано, что традиционные удобрения и удобрительная композиция с ХБЭ увеличивали всхожесть семян лука по сравнению с контрольным вариантом без удобрений.

Фенологические наблюдения за ростом растений, количеством и сохранностью растений в конце вегетации представлены в табл. 4. Из полученных данных следует, что в варианте с УК высота главного стебля увеличивалась по сравнению с эталоном на 8.9 (25 августа) и 18.6% (25 мая). Количество растений в варианте в конце вегетации также превышало показатели эталонного варианта на 60 тыс. шт./га. Несмотря на снижение дозы удобрений в 2 раза в варианте с 0.5 УК, длина главного стебля растения превышала эталон на 2.8–4.7 см, количество растений на 1 га – на 33 тыс. шт.

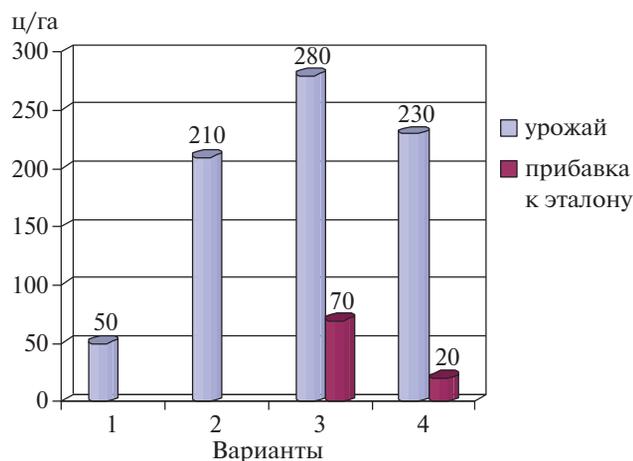
Эффективность УК, в состав которой входит ХБЭ, проявлялась также в сохранности растений в конце вегетации. Например, если в контроле показатель составил 82, в эталонном варианте – 86, то в вариантах применения УК и 0.5 УК – 93 и 90%.

Полученные результаты хорошо согласовались с данными урожайности репчатого лука (рис. 1). Установлено, что УК обеспечивала прибавку урожайности 70 ц/га в сравнении с традиционными удобрениями, а при снижении ее нормы на 50% – на 20 ц/га.

Биометрические показатели развития растений хорошо согласовались с результатами анализа почвы, свидетельствующими об оптимизации питательного режима при применении удобрительной композиции. Улучшение питания растений отражено в уровне содержания N, P и K в биомассе растений лука (табл. 5).

Например, в варианте с УК содержание N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и K<sub>2</sub>O в почве (в пахотном горизонте) в сравнении с эталоном повышалось на 25.1; 44.0 и 3.4% соответственно. При этом установлено увеличение содержания гумуса в почве на 0.06% (на 5.6 и 2.8% по отношению к контрольному и эталонному вариантам).

Агрохимические показатели почвы хорошо согласуются с содержанием макроэлементов в листьях растений лука: применение УК способствовало увеличению в биомассе N на 16.7, P – на 2.8,



**Рис. 1.** Урожайность лука репчатого при применении стандартных удобрений и удобрительной композиции, варианты: 1 – контроль без удобрений, 2 – эталон N88P50K30, 3 – УК + K30, 4 – 0.5 УК + K15.

К – на 3.6% по отношению к эталонному варианту. Несмотря на снижение дозы удобрительной композиции в 2 раза, в варианте с 0.5 УК также установлено достоверное увеличение количества макроэлементов в листьях: N – на 15.5, P – на 1.4, K – на 2.7% в сравнении с эталонным вариантом.

Необходимо отметить высокую корреляционную зависимость агрохимических характеристик почвы и содержания NPK в растениях. Содержание азота в почве и в листьях и содержание калия в почве и в листьях имели высокие коэффициенты корреляции – до 0.91, несколько меньше был уровень зависимости содержания доступных форм фосфора в почве и содержания его в растениях –  $\approx 0.8$ . Кроме того, тесная зависимость обнаружена между урожайностью лука репчатого и содержанием в почве N ( $r = 0.92$ ), P ( $r = 0.74$ ), гу-

муса ( $r = 0.74$ ), и несколько меньше содержания K ( $r = 0.55$ ).

Бактериологический анализ почвы, отобранной в период образования луковиц, установил в вариантах с УК и 0.5 УК повышение численности азотфиксирующих бактерий в 2.3 и 2.2 раза (до 1.12 млн КОЕ/г почвы), фосфатмобилизирующих бактерий – в 2.7 и 2.3 раза (до 1.5 млн/г), аммонифицирующих микроорганизмов – в 2.3 и 2.1 раза (до 1.35 млн КОЕ/г), а также снижение численности олиготрофов в 1.6 и 1.5 раза (до 7.2 млн КОЕ/г) и денитрификаторов – в 2.7 и 2.5 раза (до 5.0 млн КОЕ/г почвы) в сравнении с эталонным вариантом (табл. 6).

Можно констатировать, что в почве с минеральными удобрениями процессы разложения гумусовых соединений (контролируемых олиготрофами) преобладали над процессом микробного синтеза и гумификации, т.е. отмечен сдвиг баланса в сторону минерализации. В эталонном варианте были вероятны также значительные потери азотных соединений под воздействием денитрификаторов. Напротив, входящий в состав удобрительной композиции ХБЭ, обогащенный сульфатом железа, выступал как протектор почвенного органического вещества и минеральных соединений, снижая интенсивность процессов минерализации и увеличивая КПД внесенных удобрений.

Важно, что урожайные данные и агрохимические характеристики почвы под посевами лука имели высокую степень корреляции с численностью микроорганизмов различных ЭТГ (в фазе образования луковиц), участвующих в трансформации макроэлементов в почве (табл. 7).

Таким образом, применение новой удобрительной композиции на основе фосфоритной муки Каратау (месторождения Кок-Джон участка Аралтобе), аммиачной селитры, хлорофилл-белкового экстракта растения рода *Juniperus*, обогащенного сульфатом железа, позволило обеспечить увеличение урожайности сельскохозяйственных культур, улучшить качество готовой продукции, повысить эффективность минеральных удобрений, снизить их общую потребность и затраты на применение. Следует указать, что снижение химической нагрузки на почву за счет уменьшения дозы удобрений без ущерба для урожайности может способствовать позитивному изменению окружающей среды и повышению плодородия почв.

Причина позитивного эффекта удобрительной композиции состоит в благоприятном воздействии биологически активных соединений, входящих в состав УК (хлорофилл-белковый экс-

**Таблица 5.** Влияние УК на содержание питательных элементов и биомассе растений в фазе 7–9 настоящих листьев лука (полевой опыт)

Вариант	Гумус, %	Почва, мг/кг			Растения, %		
		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P	K
1. Контроль	1.07	24.0	12.6	205	0.82	0.68	1.10
2. Эталон N88P50K30	1.07	26.3	13.4	203	0.84	0.71	1.11
3. УК + K30	1.13	30.6	19.3	210	0.98	0.73	1.15
4. 0.5 УК + K15	1.10	28.1	18.9	208	0.97	0.72	1.14
Стандартное отклонение	0.03	2.8	3.5	3	0.08	0.02	0.02
Доверительный интервал	0.03	2.7	3.5	3	0.08	0.02	0.02

**Таблица 6.** Влияние удобрительной композиции на численность почвенных микроорганизмов (полевой опыт)

Вариант	Численность почвенных микроорганизмов, млн КОЕ/г почвы				
	азотфиксирующие	фосфатмобилизирующие	аммонифицирующие	олиготрофы	денитрификаторы
1. Контроль	0.52	0.58	0.59	7.0	5.1
2. Эталон N88P50K30	0.50	0.56	0.60	11.2	13.5
3. УК + K30	1.12	1.50	1.35	7.0	5.0
4. 0.5 УК + K15	1.08	1.30	1.27	7.2	5.3
Стандартное отклонение	0.34	0.49	0.41	2.1	4.2
Доверительный интервал	0.33	0.48	0.41	2.0	4.1

**Таблица 7.** Коэффициенты корреляции Пирсона для характеристик полевого опыта

	Численность					Гумус, %	В почве			В растении	
	азотфиксирующие	фосфатмобилизирующие	аммонифицирующие	олиготрофы	денитрификаторы		N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P
Азотфиксирующие	1.00										
Фосфатмобилизирующие	0.99	1.00									
Аммонификаторы	1.00	1.00	1.00								
Олиготрофы	-0.58	-0.57	-0.55	1.00							
Денитрификаторы	-0.59	-0.58	-0.56	1.00	1.00						
Гумус, %	0.92	0.96	0.94	-0.52	-0.53	1.00					
N почв	0.88	0.91	0.90	-0.22	-0.23	0.94	1.00				
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> почв	0.99	0.99	1.00	-0.48	-0.50	0.92	0.91	1.00			
K <sub>2</sub> O почв	0.95	0.96	0.94	-0.75	-0.75	0.95	0.81	0.91	1.00		
N раст	0.99	0.99	1.00	-0.48	-0.49	0.92	0.91	1.00	0.91	1.00	
P раст	0.80	0.81	0.82	0.01	0.00	0.81	0.96	0.86	0.65	0.86	1.00
K раст	0.97	0.98	0.98	-0.41	-0.42	0.95	0.96	0.99	0.90	0.99	0.91

тракт можжевельника, а также легкодоступное железо в виде сульфатсоединения), на корневую систему растений. Кроме того, применение полной и 50%-ной дозы удобрительной композиции обеспечило значительное изменение состава микробного сообщества в сторону увеличения числа азотфиксаторов, фосфатмобилизаторов, аммонификаторов и повышения доли этих полезных микроорганизмов в составе микробного комплекса светло-сероземной почвы.

## ВЫВОДЫ

1. В модельном опыте со светло-сероземной почвой при внесении как полной, так и половинной дозы удобрительной композиции (УК), установлено достоверное увеличение подвижных

форм азота и фосфора (на 15.8–29.9%), а также гумуса (на 4.9–7.8%) по сравнению с контрольным и эталонным вариантами.

2. Внесение азотных и фосфорных удобрений в эталонном варианте привело к небольшому увеличению числа азотфиксирующих, фосфатмобилизирующих и аммонифицирующих микроорганизмов, при значительном росте (в 1.5–2.5 раза) числа олиготрофов и денитрификаторов, свидетельствующих об интенсивных потерях за счет минерализации углерода и минерального азота. Напротив, применение удобрительной композиции (УК и 0.5 УК) сформировало благоприятные условия для значительного увеличения азотфиксаторов в 3.6–2.8 раза, фосфатмобилизаторов – в 3.5–2.2 раза, аммонификаторов – в 1.6–1.2 раза,

тогда как число олиготрофов и денитрификаторов снижалось или было близким по величине в варианте без удобрений.

3. В полевом опыте использование удобрительной композиции позволило оптимизировать питание растений лука, что выразилось в увеличении числа всходов лука, большей высоте растений (до 18.6% к контролю), сохранности растений в конце вегетации и, главное, количестве урожая. Применение полной и половинной дозы УК позволило получить урожайность лука репчатого 280 и 230 ц/га (что соответственно на 33 и 9% больше эталонного варианта).

4. Применение УК способствовало повышению содержания подвижных форм азота, фосфора и калия в почве пахотного горизонта (на 25.1, 44.0 и 3.4% в сравнении с эталоном) при некотором увеличении содержания гумуса (на 5.6 и 2.8% по отношению к контрольному и эталонному вариантам). Изменение агрохимических характеристик почвы под воздействием УК привело к изменению микробных сообществ в сторону увеличения абсолютного количества бикробиоты, а также доли аммонификаторов, азотфиксаторов и фосфатмобилизаторов, при понижении числа и доли олиготрофов и денитрификаторов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Creamer R.E., Hannula S.E., Van Leeuwen J.P., Stone D., Rutgers M., Schmelze R.M., Ruijter de P.C., Bohse Hendriksen N., Bolger T., Bouffaud M.L., Bueek M., Carvalho F., Costal D., Dirilgen T., Franciscom R., Griffithsn B.S., Griffithso R., Martin F., Martins da Silva P., Mendes S., Moraism P.V., Pereira C., Philippo L., Plassart P., Redeckerp D., Römbkef J., Sausal J.P., Woutersee M., Lemancauj P. Ecological network analysis reveals the inter-connection between soil biodiversity and ecosystem function as affected by land use across Europe // *Appl. Soil Ecol.* 2016. № 97. P. 112–124.
2. Даденко Е.В., Акименко Ю.В., Колесников С.И., Казеев К.Ш. Методы биодиагностики наземных экосистем. Ростов н/Д.: Изд-во Южного федерал. ун-та, 2016. 355 с.
3. Creamer C.A., Menezes de A.B., Krull E.S., Sanderman J., Newton-Walters R., Farrell M. Microbial community structure mediates response of soil C decomposition to litter addition and warming // *Soil Biol. Biochem.* 2015. № 80. P. 175–188.
4. Marschner P., Kandeler E., Marschner B. Structure and function of the soil microbial community in a long-term fertilizer experiment // *Soil Biol. Biochem.* 2003. № 35 (3). P. 45–61.
5. Dasci M., Gullap M.K., Erkovan H.I., Koc A. Effects of phosphorus fertilizer and phosphorus solubilizing bacteria applications on clover dominant meadow: II. Chemical composition // *Turk. J. Field Crops.* 2010. № 15 (1). P. 18–24.
6. Mackay J.E., Macdonald L.M., Smernik R.J., Cavagnaro T.R. Organic amendments as phosphorus fertilizers: chemical analyses, biological processes and plant P uptake // *Soil Biol. Biochem.* 2017. № 107. P. 50–59.
7. Сычев В.Г. Перспективы использования инновационных форм удобрений, средств защиты и регуляторов роста растений в агротехнологиях сельскохозяйственных культур // *Мат-лы докл. участников 10-й научн.-практ. конф. “Анапа-2018” / Под ред. Сычева В.Г. М.: ООО “Плодородие”, 2018. С. 3–7.*
8. Котляров Д.В., Котляров В.В., Федулов Ю.П. Физиологически активные вещества в агротехнологиях. Краснодар: КубГАУ, 2016. 224 с.
9. Шаповал О.А., Можарова И.П., Грабовская Т.Ю., Коршунов А.А., Лазарева А.С., Мухина М.Т. Регуляторы роста растений в агротехнологиях основных сельскохозяйственных культур. М.: ВНИИА, 2015. 348 с.
10. Ibrahim M., Agarwal M., Oh Yang J., Abdulhussein M., Xin Du, Hardy G., Ren Y. Plant growth regulators improve the production of volatile organic compounds in two rose varieties // *Plants.* 2019. № 8 (35). P. 1–12.
11. Richardson A.E., Simpson R.J. // Soil microorganisms mediating phosphorus availability // *Plant Physiol.* 2011. V. 156. P. 989–996.
12. Дегтярева И.А., Ильясов М.М., Храмов И.Т. Микробиологический мониторинг почв агроценозов // *Агрохим. вестн.* 2003. № 4. С. 30–32.
13. Zhang Guang Na, Zhen Hua Chen, AiMing Zhang, LiJun Chen, ZhiJie Wu. Influence of climate warming and nitrogen deposition on soil phosphorus composition and phosphorus availability in a temperate grassland, China // *J. Arid Land.* 2014. V. 6:2. P. 156–163.
14. Усманов С., Тойнасова У.М., Омарова Г.Т., Байбацаева Ш., Исахова М.М., Козыбакова Э.Б. Агрохимическая эффективность новых форм фосфорсодержащих биоудобрений в посевах хлопчатника // *Агрохимия.* 2014. № 6. С. 48–54.
15. Dakora F.D., Phillips D.A. Root exudates as mediators of mineral acquisition in low-nutrient environments // *Plant and Soil.* V. 245. Iss. 1. 2002. P. 35–47.
16. Chao Ai, Guoqing Liang, Jingwe Sun, Xiubin Wang, Ping He, Wei Zhou, Xinhua H. Reduced dependence of rhizosphere microbiome on plant-derived carbon in 32-year long-term inorganic and organic fertilized soils // *Soil Biol. Biochem.* 2015. V. 80. P. 70–78.
17. Chaparro J.M., Sheflin A.M., Manter D.K., Vivanco J.M. Manipulating the soil microbiome to increase soil health and plant fertility // *Biol. Fertil. Soils.* 2012. № 48. P. 489–499.
18. Reetz H.F. Fertilizers and their efficient use. Paris: International fertilizer industry association, 2016. 114 p.
19. Бабьева И.И., Зенова Г.М. Биология почв. М.: Изд-во МГУ, 1989. 336 с.
20. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
21. World Reference Base for Soil Resources (WRB) (рус. версия). Рабочая группа IUSS WRB. 2015. Мировая

- реферативная база почвенных ресурсов 2014, исправл. и допол. верс. 2015. Международ. система почв. классификации для диагностики почв и создания легенд почвенных карт. Докл. о мировых почвенных ресурсах № 106. Рим: ФАО, С. 157–158.
22. *Минеев В.Г.* Практикум по агрохимии. М.: Изд-во МГУ, 2002. 689 с.
23. *Зенова Г.М., Степанов А.Л., Лихачева А.А., Манучарова Н.А.* Практикум по биологии почв. М.: Изд-во МГУ, 2002. 120 с.
24. *Звягинцев Д.Г.* Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во МГУ, 1991. 303 с.
25. *Дмитриев Е.А.* Математическая статистика в почвоведении. М.: Кн. дом “ЛИБРОКОМ”, 2009. 328 с.

## Agrochemical Efficiency of Fertilizer Composition on One Crops

S. Usmanov<sup>a</sup>, G. T. Omarova<sup>a,#</sup>, O. V. Myachina<sup>b</sup>, Sh. Baibachshayeva<sup>a</sup>,  
E. N. Ramzanova<sup>a</sup>, and G. K. Zulpanova<sup>c</sup>

<sup>a</sup> *A.B. Bekturov Institute of Chemical Sciences*

*st. Sh. Ualikhanova, 106, Almaty 050010, Republic of Kazakhstan*

<sup>b</sup> *Institute of General and Inorganic Chemistry, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan  
st. Mirzo Ulugbek, 77a, Tashkent 100170, Republic of Uzbekistan*

<sup>c</sup> *FUS Scientific and Production Association Ana-Zher microdistrict "Koktem 1"  
26, apt. 72, Almaty 050040, Republic of Kazakhstan*

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

Increasing in the humus content by 5.6–2.8% was found when using a new fertilizer composition on onion crops in light gray earth, mobile forms N, P and K by 27–17, 53–50, 2.7–1.5%, increased removal by plants N, P and K by 19.5–18.3, 7.4–5.9, 4.5–3.6%, accordingly. There was a change in the number of soil microorganisms of various ecological and trophic groups: an increase in the number of free-living nitrogen fixators in 2.2–3.6 times, phosphate-immobilizing microorganisms – in 2.2–3.5 times, ammonifying bacteria – in 1.2–2.3 times, decreasing in the number of oligotrophs – in 1.5–1.6 times and denitrifiers – in 2.5–2.7 times. A high degree of dependence of macroelements removal by plants and crops on humus and NPK content in the soil is shown.

*Key words:* agrochemical effectiveness, fertilizer composition, chlorophyll-protein extract, onion crops.

УДК 631.416.1:631.811.1:631.46.5

## БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЗОТА ПОЧВЫ, УДОБРЕНИЙ, СИМБИОТИЧЕСКОЙ АЗОТФИКСАЦИИ В ПОЛЕВЫХ АГРОЦЕНОЗАХ

© 2020 г. М. Н. Новиков

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

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

*E-mail: novik.mich@yandex.ru*

Поступила в редакцию 25.11.2019 г.

После доработки 10.01.2020 г.

Принята к публикации 11.05.2020 г.

В исследованиях с 1965 по 2019 гг. на лугово-бурых и буро-подзолистых тяжелосуглинистых почвах Приамурья, на мощных слабовыщелоченных среднесуглинистых черноземах левобережной лесостепи Украины и дерново-подзолистых супесчаных почвах Мещерской низменности выявлена зависимость динамики подвижных форм почвенного азота от почвенных и гидротермических условий регионов, определены видовые параметры фитоценозов максимального использования этого азота, разработаны биологические приемы позитивного управления питанием азотом почвы и удобрений растений, эффективного использования биологического азота в полевых биологизированных севооборотах.

*Ключевые слова:* азот почвы, азот удобрений, симбиотический азот, управление азотным питанием, биологические приемы, биологизированные севообороты.

**DOI:** 10.31857/S0002188120080086

### ВВЕДЕНИЕ

Азот, наряду с углеродом, водородом и кислородом входит в группу элементов-органогенов. Он является важной составной частью белка растений и животных. “... Если не говорить о воде, то именно азот является самым могущественным двигателем в процессах развития, роста и творчества природы, его уловить, им овладеть – вот в чем задача, его сберечь – вот в чем путь к экономике; подчинить себе его источник, бьющий с неистощимой энергией – вот в чем тайна благосостояния.” [1]. Это напутствие Д.Н. Прянишникова явилось основополагающим в научно-исследовательской работе по изучению и рациональному использованию азота почвы, органических и минеральных удобрений, симбиотического азота в биологизированных севооборотах.

Новизна исследований оптимизации использования минерального и биологического азота, издавна относящихся к числу основных проблем биологической науки, заключается в том, что они охватывают довольно контрастные почвенно-климатические зоны страны и приоритетные источники азотного питания растений, предлагают биологические, экологические приемы эффек-

тивного управления этим процессом, получение добавочной продукции растениеводства.

Цель работы – разработка биологических приемов эффективного использования азота почвы, удобрений, симбиотической азотфиксации в полевых агроценозах.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили с 1965 по 2019 гг. на лугово-бурых и буро-подзолистых тяжелосуглинистых почвах Приамурья (ДальНИИСХ), на мощных слабовыщелоченных среднесуглинистых черноземах левобережной лесостепи Украины (Сумская ГОСХОС) и дерново-подзолистых супесчаных почвах Мещерской низменности (ВНИИОУ), которые существенно различались не только по генезису, физическим свойствам, но и агрохимическим показателям пахотного слоя (табл. 1).

Почвы Приамурья и черноземы лесостепи Украины характеризовались более высоким содержанием гумуса, общего и гидролизующего азота. Их содержание в дерново-подзолистых почвах было низким [2]. Наряду с хорошей гумусированностью почвы Приамурья отличались высокой

**Таблица 1.** Агрохимическая характеристика пахотного слоя почв (0–25 см)

Гумус, %	N <sub>общ</sub> , %	N <sub>гидр</sub> , мг/кг почвы	pH <sub>KCl</sub>	H <sub>г</sub>	S	Подвижные формы, мг/кг почвы	
				мг-экв/100 г почвы		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Лугово-бурая оподзоленная тяжелосуглинистая почва							
5.60	0.23	56	4.3	8.44	17.0	12	165
Буро-подзолистая тяжелосуглинистая почва							
4.46	0.24	43	4.2	8.62	15.8	17	150
Чернозем мощный слабовыщелоченный среднесуглинистый							
4.60	0.30	34	6.4	1.8	29.5	144	110
Дерново-подзолистая супесчаная почва							
1.07	0.10	14	5.2	1.9	4.3	90	86

**Таблица 2.** Гидротермические условия вегетационного периода

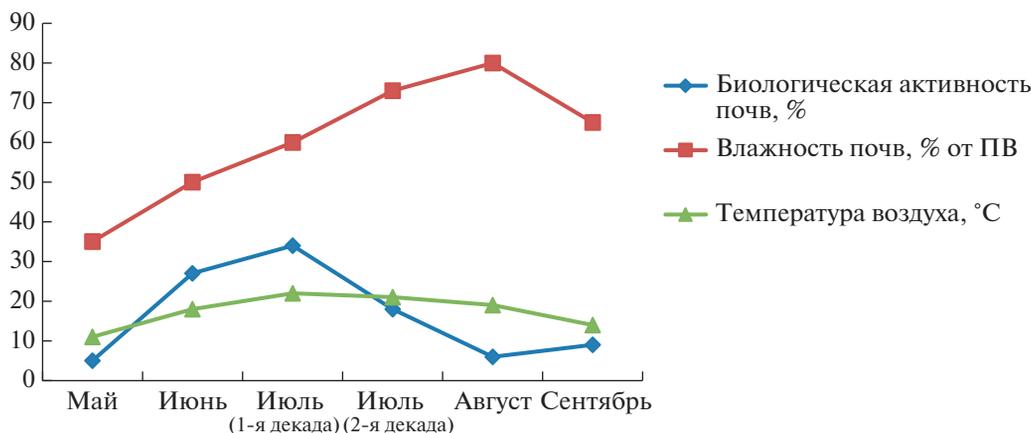
Метеостация	Месяцы вегетационного периода					Сумма осадков/Сумма активных температур
	май	июнь	июль	август	сентябрь	
	Осадки, мм					
Вяземская, Хабаровский край	66	95	123	132	94	510
г. Хабаровск	61	80	115	123	80	459
г. Сумы	45	65	68	51	38	264
г. Владимир	52	67	77	65	57	318
Среднемесячная температура воздуха, °С						
Вяземская, Хабаровский край	11.3	17.1	20.6	19.6	13.0	2500
г. Хабаровск	11.1	17.4	21.1	20.0	13.9	2680
г. Сумы	14.5	18.4	19.9	18.6	13.0	2582
г. Владимир	11.7	15.7	18.2	16.2	10.5	2212

кислотностью и крайне низким содержанием подвижных форм фосфора, что было связано с большим содержанием в них полуторных окислов железа и алюминия [3]. Реакция почвенной среды черноземов была близка к нейтральной, дерново-подзолистых почв – слабо кислая. Содержание подвижного фосфора в этих почвах было соответственно повышенным и средним, калия – средним. Тяжелосуглинистые почвы Приамурья имели повышенное содержание калия и, как правило, слабо нуждались в калийных удобрениях.

Климатические условия регионов (табл. 2), особенно по количеству осадков в течение вегетационного периода, довольно контрастны. Их значительное количество, особенно во 2-й половине вегетации растений, отмечено в Приамурье, что связано с интенсивным выпадением муссонных дождей со 2-й декады июля и по 1-ю декаду сентября, это часто приводило к сильному переувлажнению почвы, вымыванию из нее подвиж-

ных форм органического вещества, азота и других элементов питания [4], гибели растений [5]. Почти в 2 раза меньше выпадает осадков в лесостепной зоне Украины и 1.5 раза – в условиях Мещерской низменности. При этом в 2-х последних регионах осадки в течение вегетации выпадают относительно Приамурья равномерно. Приоритет прихода тепла за вегетационный период отмечен в Приамурье и лесостепной зоне Украины. Наиболее теплыми во всех зонах являются июнь–август, но раньше наступает весна и длинней период активной вегетации в зоне черноземных почв.

Опыты предусматривали изучение приемов эффективного использования культурными растениями азота почвы, органических, минеральных удобрений и симбиотической азотфиксации. Исследование проводили в полевых и лабораторных опытах специального назначения и как сопутствующие эксперименты в опытах с различными видами и формами удобрений. Величина



**Рис. 1.** Динамика биологической активности буро-подзолистых почв в зависимости от гидротермических условий, % разложения льняной ткани.

опытных делянок — от 35 до 2000 м<sup>2</sup>, повторность трех–четырёхкратная. В почве опытов изучали динамику биологической активности [6], агрохимические исследования почв, удобрений, лизиметрических вод в основном выполняли по Петербургскому [7], Аринушкиной [8], Минееву [9], методическим указаниям ВАСХНИЛ [10] и соответствующим ГОСТам. Также проводили лизиметрические исследования миграции почвенного раствора [11, 12], накопление симбиотического азота бобовыми культурами [13]. Статистическую обработку результатов исследования проводили по [14]. Агротехника в опытах — общепринятая для соответствующих регионов проведения исследования [15–17].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Синтез и минерализация гумуса, интенсивность разложения растительных остатков, динамика содержания солей почвенного раствора, а в связи с этим и корневое питание растений во многом зависят от жизнедеятельности микроорганизмов и биологической активности почвы. Наиболее распространенными методами ее определения являются чашечный метод путем учета микроорганизмов на различных питательных средах, газоаналитический, основанный на определении дыхания почвы путем учета CO<sub>2</sub>, химический — за счет показателей нитратонакопления в почве. Наши исследования [18] показали, что эти методы позволяют изучать активность почвенной микрофлоры на момент отбора образца почвы, что не отображает ее состояние во времени. Этот недостаток сглаживается путем определения биологической активности почвы методом аппликаций [6], который был использован в нашем исследовании. Результаты, полученные этим

методом, и их динамика тесно коррелировали с содержанием подвижных форм азота в почве.

Биологическая активность существенно зависела от гидротермических условий вегетационного периода (рис. 1). Более благоприятные условия для биологической активности складываются во второй половине июня–июле, но со второй половины июля–августе и начале сентября выпадает большое количество осадков, отмечается переувлажнение почвы, что резко усугубляет жизнедеятельность микрофлоры почвы.

Максимум биологической активности других изученных почв также был приурочен к июню–июлю, но он не показал столь резких изменений как в почвах Приамурья (рис. 2).

Относительно низкой была биологическая активность пахотного слоя черноземов. Это связано с иссушением верхних слоев почвы и перемещением биологической активности в подпахотные горизонты глубиной до 60 см, тогда как в других изученных почвах сфера их биологической активности в основном была ограничена пахотным горизонтом.

Выявлена довольно тесная зависимость с биологической активностью динамики содержания нитратов в почвах в течение вегетационного периода. Максимум их содержания был приурочен к июню–июлю (рис. 3). Подобные показатели биологической активности (рис. 2) и содержания нитратов в почве (рис. 3) были благоприятными для оптимизации питания яровых зерновых культур, у которых максимум потребления азота приурочен к середине лета.

У пропашных культур (картофеля, кукурузы) наибольшая потребность в азоте приходится на конец июля–август, у сои — на август–сентябрь (рис. 4), когда содержание азота в почве далеко от оптимальных потребностей этих культур. Эти ре-

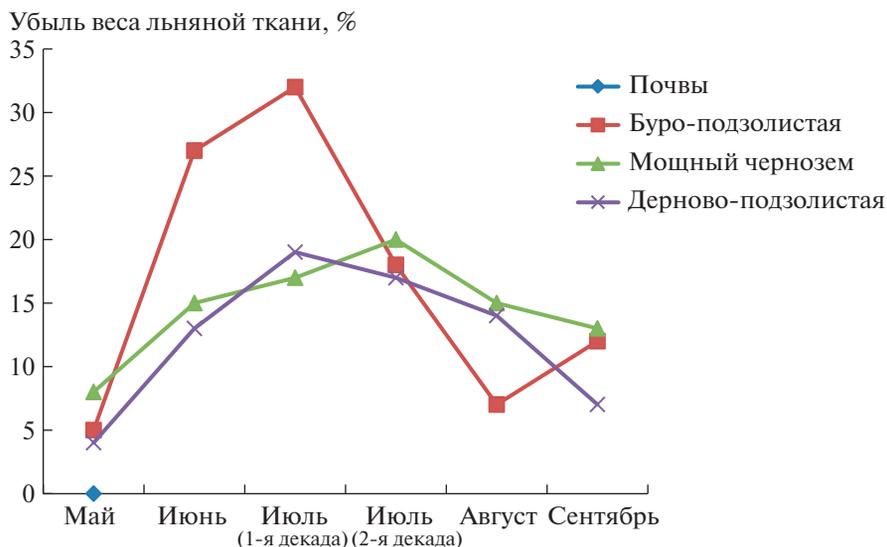


Рис. 2. Биологическая активность пахотного слоя изученных почв.

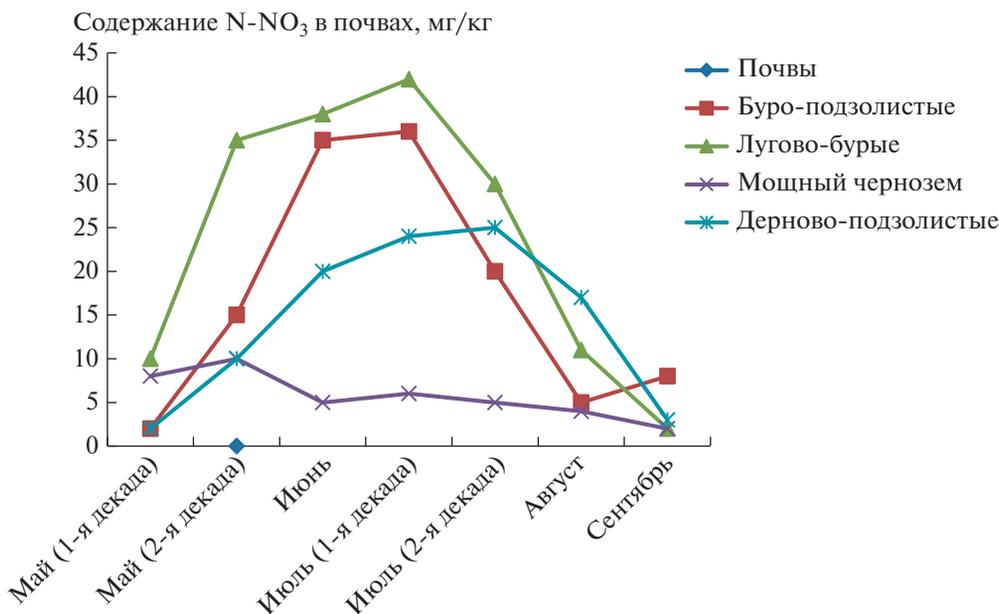


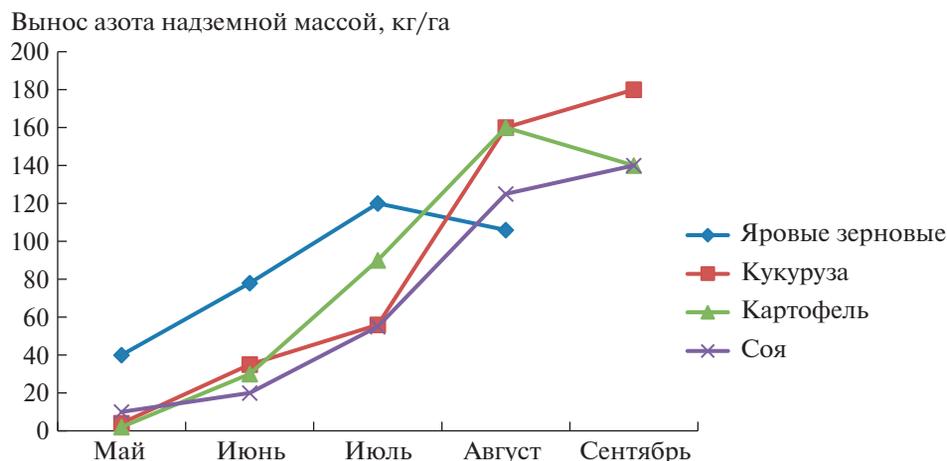
Рис. 3. Динамика содержания нитратного азота в почвах за вегетационный период.

зультаты являются ключевыми для оптимизации использования подвижных форм азота почвы и технологических решений рационального применения азотных удобрений.

Особенно контрастно роль почвенного азота и эффективные подходы к рациональному применению азотных удобрений проявились в полевом опыте на лугово-бурых почвах (табл. 3). Яровая пшеница при невысоком потенциальном урожае не реагировала на азотные удобрения, то же отмечено и в посевах кукурузы, т.к. азот минеральных удобрений ко времени интенсивного потребления

культурой был вымыт из почвы. Из-за низкого содержания фосфора в почве обе культуры хорошо отзывались на фосфорное удобрение, а кукуруза, кроме этого, – на применение подстилочного навоза, в котором азот был более устойчив к вымыванию осадками.

Большой интерес представляет не только приспособление пищевого режима фитоценозов к динамике подвижных форм азота, но и управление его содержанием в почве во времени, что достигается за счет биологической инактивации азота и последующей активизацией при разложе-



**Рис. 4.** Динамика выноса азота биомассой культур с урожайностью: зерна ячменя – 40, клубней картофеля – 250, зеленой массы кукурузы – 500, бобов сои – 20 ц/га.

нии органического вещества с высоким содержанием углерода, в частности соломы злаковых культур (рис. 5).

Для этого исследование проводили на буроподзолистой почве в звене полевого севооборота яровая пшеница–соя, в качестве инактиватора подвижных форм азота использовали измельченную (4–7 см) солому яровой пшеницы 5 т/га, заделанную в конце июля тяжелыми дисками БДТ-3 в верхний слой почвы до 10 см и затем запаханную в середине августа под зябь на глубину 20–22 см. Весной в первой декаде мая пашню культивировали и перед посевом сои во 2-й декаде мая провели боронование тяжелыми боронами.

Азот, связанный соломой в период максимальной биологической активности почвы, служил источником питания растений во 2-ю половину вегетации сои, что отразилось на показателях ее урожайности (табл. 4).

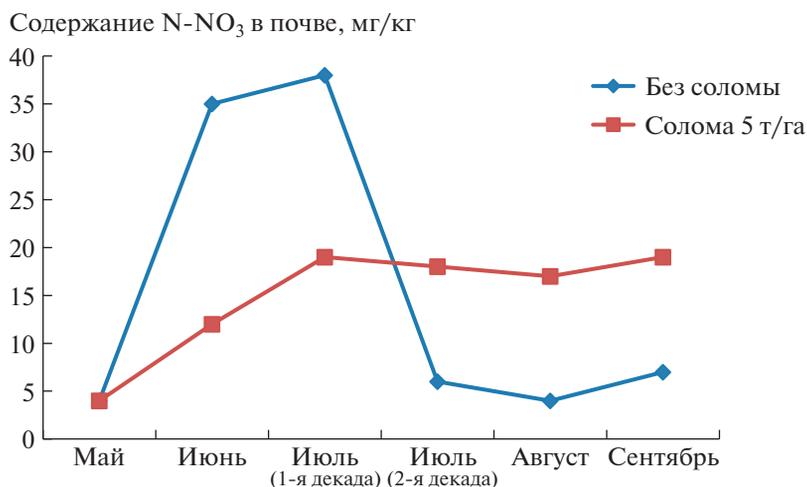
Эффективность чистой соломы в опыте была равноценна ее сочетанию с минеральными удобрениями. Положительное влияние полного минерального удобрения на урожайность сои было связано с наличием в его составе фосфора.

Во всех изученных зонах культуры с приоритетом потребления азота во 2-й половине вегетации хорошо отзывались и на другие органические удобрения, кроме соломы (табл. 5).

В 3-польных звеньях севооборотов с кукурузой и картофелем получен одинаковый прирост продукции от применения подстилочного соломистого навоза *КРС*, бесподстилочного полужидкого навоза *КРС*, соломы, сочетания соломы с бесподстилочным навозом, дозы которых были выравнены по содержанию азота в подстилочном навозе в дозе 40 т/га. Более высокая эффективность удобрений отмечена на дерново- и буроподзолистой почвах, выход продукции за звено севооборота был максимальным на черноземных

**Таблица 3.** Эффективность применения удобрений на лугово-бурых почвах, ц/га

Удобрение	Яровая пшеница		Кукуруза (зеленая масса)	
	урожайность	прибавка	урожайность	прибавка
Контроль без удобрения	14.5	–	320	–
N60	15.0	0.5	333	13
N90	15.6	1.1	350	30
P60	18.9	4.4	360	40
P90	20.3	5.7	371	51
N60P60	19.5	5.0	375	55
N90P90	21.3	6.7	396	76
Навоз подстилочный 40 т/га	22.2	7.7	434	114
<i>НСП</i> <sub>05</sub> , ц/га	2.4		36	



**Рис. 5.** Влияние соломы яровой пшеницы на динамику содержания нитратного азота в пахотном слое буро-подзолистой почвы под посевами сои.

и дерново-подзолистых почвах. Весьма важно, что в опыте определили вариант эффективного использования бесподстильного навоза и соломы: их совместное применение, что выгодно не только в экономическом плане, но и сохранении азота навоза и снижении его негативного влияния на окружающую среду.

Повысить эффективность использования азота и других удобрений можно путем внесения их в биологически активный слой почвы пахотного горизонта, определение которого методом аппликаций показано на примере буро-подзолистых почв Приамурья (рис. 6). Показано, что более высокая биологическая активность буро-подзолистых почв в течение вегетационного периода приурочена к слою 10–15 см. Аналогичным путем установлена зона максимальной биологической активности для лугово-бурых почв – 5–15 см, мощных черноземов – 10–20 см, дерново-подзолистых супесчаных почв – 5–15 см.

**Таблица 4.** Влияние соломы и минеральных удобрений на урожайность сои, ц/га

Вариант	Годы			Средние
	1972	1973	1974	
Без удобрений	9.1	16.5	16.9	14.2
Солома 5 т/га	12.5	18.2	18.7	16.4
Солома 5 т/га + N60P60K45	12.0	17.9	19.8	16.6
N60P60K45	11.2	17.5	18.5	15.7
Солома 5 т/га + N90P60K45	12.8	18.9	18.9	16.9
N90P60K45	11.6	17.6	17.5	15.2
<i>HCP</i> <sub>05</sub> , ц/га	1.7	1.6	1.6	1.6

Использование полужидкого навоза *KPC* 80 т/га под кукурузу на силос четко выявило приоритет глубины его внесения (табл. 6). В опыте навоз вносили вручную ведрами на взрыхленную путем боронования поверхность почвы и заделывали на глубину 10–15 см двукратным дискованием БДТ-3, на глубину 5–15 см – однократным дискованием с последующей культивацией с боронованием, на глубину 10–20 см – запашкой плугом с предплужником, на 15 см – последующими культивацией с боронованием. Навоз, внесенный в биологически активные слои почвы, способствовал существенному увеличению содержания нитратов в пахотном слое и достоверному приросту урожая зеленой массы кукурузы.

Д.Н. Прянишников [1], рассуждая о рациональном применении минеральных удобрений, считал, что в системе удобрения они должны исправлять недостатки органических удобрений. Это мнение подтвердилось в нашем опыте на черноземных почвах (табл. 7). Без органических удобрений наибольший урожай 472 ц/га получен при дозе минерального удобрения (NPK)120 (100%), от сочетания подстильного и бесподстильного навоза с минеральными удобрениями – 596 ц/га (126%), соломы – 583 ц/га (124%), сочетания соломы с бесподстильным навозом – 609 ц/га (129%), сидератов рапса – 578 ц/га (122%). Обычно органо-минеральную систему удобрения рассматривают как сочетание органического и полного минерального удобрения, но как показали данные исследования, с подстильным навозом *KPC* более экономически выгодно применение полного минерального удобрения с низким дозами элементов питания, с бесподстильным навозом *KPC* достаточно внесения низ-

Таблица 5. Сравнительная эффективность удобрений в полевых севооборотах

Вариант	Буро-подзолистая почва		Чернозем мощный		Дерново-подзолистая почва	
	Севообороты					
	кукуруза—яровая пшеница—соя		кукуруза—однолетние травы—озимая пшеница		картофель—ячмень— однолетние травы	
	Продуктивность севооборота					
	ц з.е./га	%	ц з.е./га	%	ц з.е./га	%
1. Контроль без удобрения	97	100	152	100	122	100
2. Навоз КРС подстилочный 40 т/га (сравнение с N180P92K200)	126	130	179	118	170	139
3. Навоз КРС полужидкий 80 т/га (эквивалентно варианту 2 по количеству N)	122	126	177	116	170	139
Солома 5 т/га + NPK (эквивалентно варианту 2 по количеству NPK)	121	125	184	121	170	139
Солома 5 т/га + навоз полужидкий (эквивалентно варианту 2 по количеству N)	123	127	181	119	171	140
<i>HCP</i> <sub>05</sub> , ц/га	16		18		19	

ких доз фосфора, соломой – средних и высоких доз азота. Сочетание соломы с бесподстилочным навозом и сидераты капустных культур более эффективны с низкими дозами полного минерального удобрения. Дополнительно к вышесказанному нужно отнести применение бесподстилочного помета и торфопометных компостов, которые для оптимизации эффективности нуждаются в небольших дозах калийных удобрений. Характерно, что в

органо-минеральной системе удобрения коэффициенты усвоения элементов питания растениями из органических удобрений возрастают.

Наибольшие потери азота почвы и удобрений от вымывания отмечены в чистых парах, значительно они снижаются в севооборотах под полевыми культурами [4] и при внесении минеральных и органических удобрений под удобряемые растения через промежуточные сидераты. В дан-

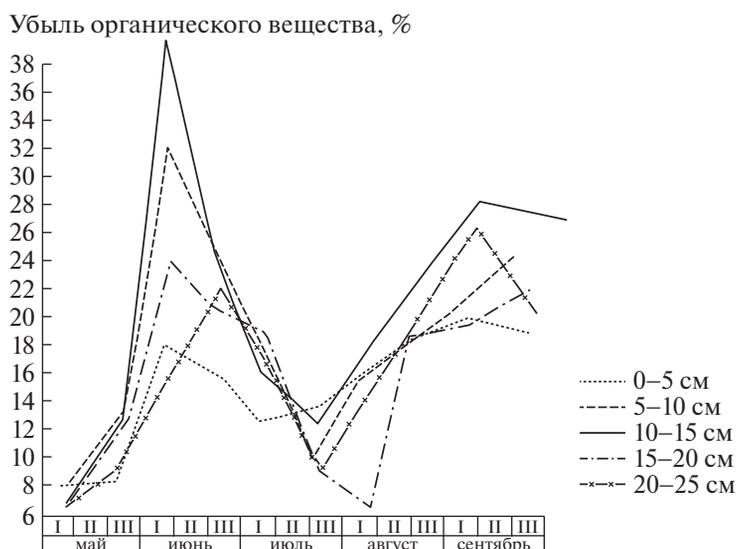


Рис. 6. Биологическая активность почв в профиле пахотного горизонта.

**Таблица 6.** Содержание азота в слое 0–25 см почвы и урожайность зеленой массы кукурузы в зависимости от глубины внесения навоза КРС 80 т/га

Глубина внесения навоза, см	Содержание N-NO <sub>3</sub> (мг/кг почвы)/% к контролю		Урожайность кукурузы (ц/га)/% к контролю	
	буро-подзолистая почва	мощный чернозем	буро-подзолистая почва	мощный чернозем
Контроль без удобрения	19.7/100%	4.80/100%	249/100%	390/100%
0–5	25.5/129%	5.62/117%	341/137%	455/117%
5–10	28.8/146%	6.73/140%	356/143%	463/100%
10–15	34.0/172%	8.20/171%	380/153%	503/129%
15–20	26.5/134%	8.14/170%	354/142%	507/130%
20–25	25.3/128%	5.70/119%	344/138%	485/124%
<i>НСР</i> <sub>05</sub>	2.2	1.2	21	33

**Таблица 7.** Эффективное использование минерального азота в системе органо-минерального удобрения под кукурузу на силос на черноземных почвах, ц/га

Минеральные удобрения	Органические удобрения					
	без органических удобрений	навоз подстилочный 40 т/га	навоз бесподстилочный 80 т/га	солома 6 т/га	солома + навоз бесподстилочный (50% + 50%)	сидераты (рапс 27 т/га)
0	394	494	500	452	486	483
N60	423	550	530	514	520	504
N90	418	507	535	536	533	520
N120	382	488	538	552	527	572
P60	425	534	578	483	533	483
P90	436	497	586	490	560	473
P120	416	469	565	471	550	462
(NPK)60	428	588	587	535	595	561
(NPK)90	441	596	597	552	609	578
(NPK)120	472	583	591	583	607	568
Средние	424	531	562	517	557	517
<i>НСР</i> <sub>05</sub> , ц/га	26	18	23	20	22	18

ном случае, кроме снижения потерь азота, заметно возрастает эффективность удобрений [2, 19].

В опыте на дерново-подзолистых почвах при внесении полного минерального удобрения (NPK)120 под сидераты редьки масличной, запаханной под озимую рожь, прибавка урожая зерна составила 11.2 ц/га, в случае непосредственного применения удобрений под рожь – 5.7 ц/га. Дополнительный урожай зерна от данного агроприема достиг 5.5 ц/га. Другой опыт проводили в 5-польном севообороте однолетние травы–картофель–яровое тритикале–овес–горчица белая на семена. Навоз КРС подстилочный в дозе 60 т/га использовали под картофель осенью в сен-

тябре под зябь, весной в мае под перепашку зяби и в конце июня под промежуточные сидераты горчицы белой. Во всех вариантах с навозом весной под культивацию перед нарезкой гребней вносили НФК из расчета (NPK)90. Контролем служил вариант без удобрений. Традиционные способы внесения навоза увеличили продуктивность севооборота на 25%, внесение навоза под укосные сидераты – на 53%.

В системе удобрения при биологизации земледелия ведущим компонентом является биологический азот. На дерново-подзолистых супесчаных почвах коллективом лаборатории сидератов (М.Н. Новиков, Л.Д. Фролова, Л.И. Ермакова,

**Таблица 8.** Приемы эффективного использования биологического азота

Приемы использования биологического азота бобовых культур	Прибавка урожайности, ц/га	% к контролю
Смешанные посевы с люпином [20] увеличивали урожайность смеси к среднесуммарному урожаю компонентов		
яровых зерновых (зерно: среднее для пшеницы, ячменя, овса)	13.6	60.0
кукурузы на силос (сухое вещество)	29.0	72.5
райграса (укосный урожай – сухое вещество)	36.0	62.0
рапса (укосный урожай – сухое вещество)	29.0	47.5
овса (укосный урожай – сухое вещество)	20.0	43.5
Использование люпина как покровной культуры при возделывании многолетних трав в сравнении с беспокровными посевами [21, 22]		
клевер луговой (зеленая масса, среднее за 3 года пользования)	85.5	29.9
клевер + тимофеевка (зеленая масса, среднее за 3 года пользования)	65.0	28.1
timoфеевка (зеленая масса, среднее за 3 года пользования)	22.0	73.3
козлятник (зеленая масса, среднее за 9 лет пользования)	37.0	21.0
Использование люпина и донника как предшественников кукурузы в кормовых севооборотах в сравнении с бессменным посевом кукурузы [23]		
повышение урожайности зеленой массы кукурузы	127	24.0
экономия азота минеральных удобрений для получения максимальной урожайности кукурузы, кг/га	60	50
Биологизированная система удобрения в сравнении с органо-минеральной на запланированный урожай культур полевого 7-польного севооборота [24]		
повышение продуктивности севооборота, кг з.е./га	0.0	0.0
снижение применения NPK минеральных удобрений	45	40.0
увеличение продуктивности 1 кг NPK удобрений, кг з.е.	3	28.5

В.Н. Баринов) в результате научных исследований выявлен ряд приемов эффективного использования в агроценозах симбиотического азота бобовых культур (табл. 8). Разработанные приемы повышения продуктивности растений за счет биологического азота в большинстве случаев имели высокую экономическую эффективность, положительно влияли на содержание белка в продукции, способствовали повышению обеспечения кормов переваримым протеином, положительно влияли на плодородие почв и фитосанитарное состояние биоценозов.

## ВЫВОДЫ

1. Длительные исследования в различных почвенно-климатических зонах страны выявили динамику содержания подвижных форм азота в почвах во времени, что позволило путем подбора соответствующих фитоценозов максимально использовать этот азот как удобрение, предохранить, или значительно снизить его вымывание и денитрификацию.

2. Управление содержанием подвижного азота в почве для оптимизации питания растений возможно путем биологической инактивации его с последующей активизацией за счет использования в качестве удобрения органических веществ с широким отношением углерода к азоту.

3. Из органических удобрений в органо-минеральной системе более требовательны к азотному компоненту слаборазложившийся солоmistый навоз, солома злаковых и сидераты капустных культур. Сидераты бобовых растений, бесподстилочные навоз и помет в азоте не нуждаются.

4. Повышение эффективности использования азота минеральных и органических удобрений достигается путем внесения их под удобряемые растения в биологически активный слой пахотного горизонта и под промежуточные сидераты капустных культур.

5. Разработан ряд агроприемов рационального применения биологического азота бобовых культур в полевых и кормовых севооборотах.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Прянишников Д.Н.* Азот в жизни растений и в земледелии СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1945. 197 с.
2. *Новиков М.Н.* Система биологизации земледелия в Нечерноземной зоне (Научно-практические рекомендации на примере Владимирской области). М.: Росинформагротех, 2007. 296 с.
3. *Басистый В.П.* Сезонная динамика процесса почвообразования и ее влияние на фосфорный режим буро-подзолистых почв Приамурья: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Хабаровск, 1967. 22 с.
4. *Новиков М.Н.* Миграция элементов питания и ее ограничение в различных почвах // Лизиметрические исследования в России. Сб. научн. публ. Немчиновка: НИИСХ ЦРНЗ, 2004. С. 108–115.
5. *Бурлака В.В.* Биологические основы растениеводства на переувлажняемых почвах Дальнего Востока. Хабаровск, 1967. 279 с.
6. *Мишустин Е.Н., Востров И.С.* Аппликационные методы в почвенной микробиологии // Микробиологические и биохимические методы исследования почв. Киев: Урожай, 1971. 260 с.
7. *Петербургский А.В.* Практикум по агрохимии. М., 1968. 490 с. ГОСТ 26488.
8. *Аринушкина В.В.* Руководство по химическому анализу почв. М.: Наука, 1965. 490 с.
9. *Минеев В.Г.* Практикум по агрохимии. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
10. Агрохимические методы исследования почв. М.: Наука, 1975. 644 с.
11. *Голубев В.А.* Лизиметрические методы исследования в агрохимии и почвоведении. М., 1967. 111 с.
12. *Шилова Е.И.* Методы получения почвенного раствора в природных условиях // Почвоведение. 1955. № 11. С. 86–90.
13. *Посыпанов Г.С.* Методы изучения биологической фиксации азота воздуха. М.: Агропромиздат, 1991. 300 с.
14. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. М., 1968. 336 с.
15. Система ведения сельского хозяйства Дальнего Востока / Под ред. Казьмина Г.Т. Хабаровск, 1968. 527 с.
16. Научно обоснованная система земледелия для Сумской области. Сумы, 1982. 292 с.
17. *Автонеев К.И., Агре Д.А., Григорьев А.А.* Система ведения земледелия Владимирской области. Владимир, 1983. 313 с.
18. *Новиков М.Н.* К оценке методов определения биологической активности почв Приамурья // Сб. тр. “Вопросы методологии и методики научных исследований”. Вып. 1. Новосибирск, 1972. 289 с.
19. *Фролова Л.Д., Новиков М.Н.* Рациональные приемы использования органических удобрений на легких почвах Владимирской области // Владимир. земледелец. 2016. № 3. С. 17–19.
20. *Новиков М.Н., Такунов И.П., Слесарева Т.Н., Баринов В.Н.* Смешанные посевы с люпином в земледелии Нечерноземной зоны. М.: ООО “Столичная типография”, 2008. 160 с.
21. *Баринов В.Н., Новиков М.Н.* Опыт использования бобовых культур для подкормки многолетних трав // Агрохимия. 2015. № 5. С. 28–32.
22. *Баринов В.Н., Новиков М.Н.* Козлятник восточный в системе биологизации земледелия на легких почвах Нечерноземной зоны // Владимир. земледелец. 2019. № 2. С. 33–36.
23. *Фролова Л.Д.* Оптимизация кормовых севооборотов с кукурузой // Владимир. земледелец. 2018. № 1. С. 26–29.
24. *Ермакова Л.И., Новиков М.Н.* Продуктивность биологизированной системы удобрения в полевом севообороте на легких почвах // Владимирский. земледелец. 2017. № 2. С. 15–16.

## Biological Methods of Effective Use of Nitrogen of Soil, Fertilizers, Symbiotic Fixation in Field Agrocenoses

M. N. Novikov

*All-Russian Scientific Research Institute of Organic Fertilizers and Peat – Branch of “Verkhnevolzhskaya FANS”  
ul. Pryanishnikova 2, Vladimir region, Sudogodsky district, p. Vyatkinо 601390, Russia*

*E-mail: novik.mich@yandex.ru*

In research from 1965 to 2019 on meadow-brown and brown-podzolic loamy soils of the Amur region on powerful slightly leached medium loamy chernozems of the left-Bank Ukrainian forest-steppe and sod-podzolic sandy loam soils of the Meshchera lowlands dependence of the dynamics of mobile forms of soil nitrogen from soil and hydrothermal conditions of the regions, defined the specific parameters of phytocenoses maximum use of this nitrogen, developed by the biological positive techniques power management nitrogen soil and fertilizer plants, effective use of biological nitrogen in field biologized crop rotations.

*Key words:* soil nitrogen, fertilizer nitrogen, symbiotic nitrogen, nitrogen nutrition management, biological techniques, biologized crop rotations.

УДК 631.879.2:632.187.1

## АГРОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД ДЛЯ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ЗЕМЕЛЬ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

© 2020 г. Г. Е. Мерзлая<sup>1,\*</sup>, Р. А. Афанасьев<sup>1,\*\*</sup>

<sup>1</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова  
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

\*E-mail: lab.organic@mail.ru

\*\*E-mail: rafail-afanasev@mail.ru

Поступила в редакцию 16.01.2020 г.

После доработки 04.02.2020 г.

Принята к публикации 11.05.2020 г.

В исследовании, выполненном в 2-х полевых и научно-производственном опытах с удобрениями на основе осадков сточных вод (ОСВ), установлено, что содержащиеся в них органические и минеральные ингредиенты являются ценными питательными веществами для биоценозов. ОСВ, отвечающие санитарно-гигиеническим нормам, положительно воздействуют на продуктивность и качественные характеристики возделываемых культур и их можно использовать в качестве удобрений в земледелии, а также при озеленении городских территорий. Особое значение они могут иметь для восстановления экосистем при поражении лесокустарниковой растительности пожарами.

*Ключевые слова:* осадки сточных вод, химический состав, удобрительная ценность, биоценозы, эффективность, способы использования осадков сточных вод.

DOI: 10.31857/S0002188120080050

### ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях в повышении плодородия почв важная роль отводится максимально-му использованию биологических факторов, прежде всего применению органических удобрений, ассортимент которых отличается большим разнообразием [1, 2], включая осадки сточных вод (ОСВ). Известно, что ОСВ образуются на очистных сооружениях городов и населенных пунктов городского типа при разделении сточных вод на жидкую фракцию и взвешенную субстанцию. С развитием городского строительства проблема утилизации ОСВ приобретает все большее значение [3, 4]. Однако в России в качестве удобрений из общего объема ОСВ используется не более 5–7%, а остальная их часть концентрируется на иловых площадках или подвергается захоронению. Проблема утилизации ОСВ актуальна и за рубежом, хотя доля их использования в сельском хозяйстве во многих странах значительно больше, чем в России: в Швейцарии – 70, Германии – 38, Франции – 23%.

Между тем целесообразность использования ОСВ в земледелии России доказана длительными научными исследованиями, проведенными рос-

сийскими учеными в разных регионах страны. Установлено, что значительные объемы ОСВ бытового и промышленно-бытового происхождения могут быть с успехом использованы при возделывании сельскохозяйственных культур, а также при озеленении городских территорий, в дорожном строительстве при залужении откосов различных магистралей, в лесных питомниках [5, 6]. Показано, что внесение ОСВ, соответствующих по своему составу требованиям экологической безопасности [7–9], как правило, при совместном применении с минеральными удобрениями, повышает урожайность и качество растительной продукции [10]. В связи с расширением в последние годы лесных пожаров в России и ряде других стран возникла необходимость рекультивации пораженных территорий для восстановления их экологического равновесия.

Цель работы – решение сразу 2-х проблем: с одной стороны, проблемы утилизации ОСВ, пригодных для использования в качестве удобрения и, соответственно, снижающих негативное воздействие на окружающую среду, с другой, – проблемы рекультивации земель, пораженных лесными пожарами.

**Таблица 1.** Химический состав почвогрунтов марок А и Б, примененных в научно-производственном опыте в агрофирме “Ульянино”

Показатель	Марка	
	А	Б
Массовая доля органического вещества в пересчете на сухой продукт, %	10–30	Не менее 25
Массовая доля влаги (воды), %	40–60	
Водородный показатель солевой вытяжки, ед. рН	6.5–7.5	
Массовая доля питательных элементов, %		
азота общего (N), не менее	0.5	1.0
азота нитратного (N-NO <sub>3</sub> ), не более	0.01	0.01
фосфора общего, в пересчете на P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , не менее	1.0	1.5
калия общего, в пересчете на K <sub>2</sub> O, не менее	0.1	1.0

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в 2-х полевых и научно-производственном опытах, в которых изучали влияние *ОСВ* и удобрений на их основе на урожайность растений. Закладку и проведение опытов выполняли в соответствии с методикой опытного дела [11].

В полевом опыте, проведенном в 2010–2013 гг. в Вологодской обл. совместно с Вологодской молочно-хозяйственной академией и Государственным центром агрохимической службы “Вологодский”, изучали влияние компостов из *ОСВ* и торфа и органо-минерального удобрения – ОМУГ, состоящего из *ОСВ*, азотных и калийных удобрений, на урожайность и качество 3-х сельскохозяйственных культур: льна-долгунца, картофеля, ячменя, возделываемых в звене полевого севооборота. В соответствии со схемой опыт закладывали последовательно в течение 3-х лет, каждый

раз на новом участке, т.е. на 3-х полях. Почва в опыте – дерново-подзолистая среднесуглинистая, рН<sub>KCl</sub> 5.3, содержанием гумуса – 3.9%, подвижных форм фосфора (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) – 230, калия (K<sub>2</sub>O) – 113 мг/кг.

В другом полевом опыте, заложенном в 2010 г. на Полевой станции РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева, изучали эффективность органо-минерального удобрения на основе *ОСВ* (ОМУГ) при возделывании картофеля сорта Ред Скарлет. Почва опытного участка – дерново-подзолистая среднесуглинистая, с содержанием в пахотном слое гумуса – 2.9%, подвижного P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 270, K<sub>2</sub>O – 137 мг/кг при рН<sub>KCl</sub> 5.3.

Известно, что одним из перспективных направлений утилизации *ОСВ* служит формирование почвогрунтов для применения в городском озеленении, в лесных и декоративных питомниках, при дорожном строительстве, рекультивации нарушенных земель, полигонов твердых бытовых и промышленных отходов с условием соблюдения соответствующих природоохранных норм и регламентов. В связи с этим для изучения влияния почвогрунтов такого типа на продуктивность растений был выполнен научно-производственный опыт, закладка которого проведена в 2016 г. на угодьях агрофирмы “Ульянино” Московской обл. Почва в опыте – дерново-подзолистая среднесуглинистая с рН<sub>KCl</sub> 4.6, содержанием гумуса 2.0%, подвижного P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 70, K<sub>2</sub>O – 60 мг/кг. В опыте изучали влияние на урожайность зеленой массы овса 2-х марок почвогрунтов из смеси *ОСВ* различных городов Московской и Рязанской обл., песка и торфа (табл. 1). Опыт выполняли по схеме, включавшей 3 варианта: 1 – контроль, естественный грунт, 2 – почвогрунт “Ульянинский” марки А, 3 – почвогрунт “Ульянинский” марки Б. Площадь опытной делянки 15 м<sup>2</sup> (3 × 5 м). Повторность вариантов трехкратная. В контрольном варианте – естественный грунт, как было указано выше, представлен дерново-подзолистой суглинистой почвой, слабообеспеченной питательными веществами. Поч-

**Таблица 2.** Химический состав удобрений на основе *ОСВ*

Вид удобрения	Зольность, %	рН <sub>KCl</sub>	Содержание, % от сухого вещества			
			органического вещества	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
Компост (осадок + торф)	33.2	6.3	66.8	1.95	0.8	0.3
ОМУГ	77.5	7.5	22.5	2.80	3.1	2.5
Нормативы по ГОСТ Р 17.4.3.-07-2001	Не нормирована	5.5–8.5	Не менее 20	Не менее 0.6	Не менее 1.5	Не нормировано

**Таблица 3.** Содержание тяжелых металлов и мышьяка (валовые формы) в удобрениях на основе *ОСВ*, мг/кг сухого вещества

Вид удобрения	Cu	Zn	Pb	Cd	Ni	Cr	Mn	Co	Hg	As
Компост ( <i>ОСВ</i> + торф)	45	140	14.3	1.06	13.4	12	217	4.3	0.11	1.2
ОМУГ	406	1584	69.8	14.6	34.1	236	701	6.7	1.40	2.6
Нормативы по ГОСТ Р 17.4.3.-07-2001, не более	750	1750	250	15	200	500	Не нормировано		7.5	10

вогрунты марок А и Б насыпали слоем 30 см в траншеи на подпахотный горизонт, т.е. вместо пахотного горизонта. Предпосевная обработка во всех вариантах опыта состояла в проведении фрезерования и боронования. Испытания почвогрунтов в опыте проводили с посевом овса на зеленую массу. Норма высева семян овса – 200 кг/га. Под покров овса была высеяна смесь газонных трав в составе райграса многолетнего, овсяницы красной и мятлика лугового общей нормой высева 36–40 кг/га. Посев овса и многолетней травосмеси проводили в летнее время, в июне.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В полевом опыте, заложенном в условиях Вологодской обл., применяли компост, произведенный на очистных сооружениях “Вологдагорводоканала” из *ОСВ* г. Вологды и торфа в соотношении 1 : 1, а также органо-минеральное удобрение ОМУГ в виде гранул размером 14 × 20 мм, созданное на основе обезвоженного *ОСВ* в ЗАО “Твин Трейдинг Компани”. Химический состав примененных в опыте удобрений приведен в табл. 2. Концентрация токсичных элементов в примененных удобрениях была меньше норм ГОСТ Р

**Таблица 4.** Продуктивность звена полевого севооборота (среднее за год)

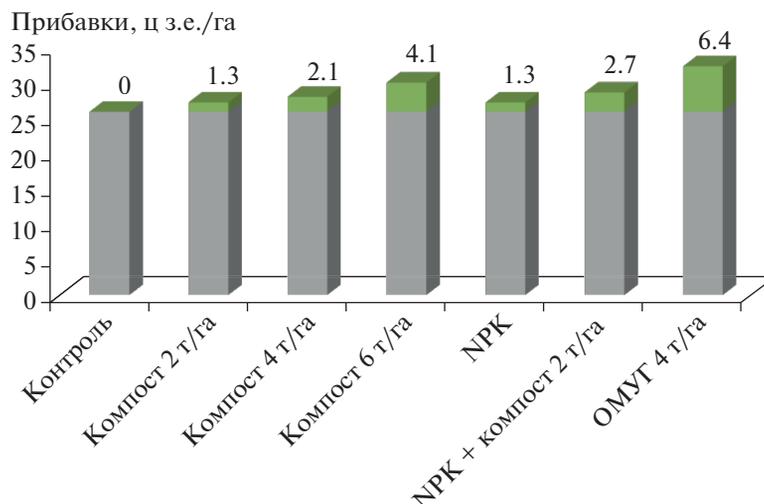
Вариант	Продуктивность, ц з.е./га	Прибавка	
		ц з.е./га	% к контролю
Контроль без удобрения	25.8	–	–
Компост 2 т/га	27.1	1.3	5.1
Компост 4 т/га	27.9	2.1	8.2
Компост 6 т/га	29.9	4.1	15.9
НРК	27.1	1.3	5.1
НРК + компост 2 т/га	28.5	2.7	10.5
ОМУГ 4 т/га	32.2	6.4	24.8
<i>НСР</i> <sub>05</sub>	1.8		

17.4.3.07-2001 для осадков сточных вод (табл. 3), что позволило считать их экологически безопасными для использования в земледелии.

Удобрения в различных исследованных дозах вносили в почву в звене севооборота под лен-долгунец, при возделывании последующих культур

**Таблица 5.** Урожайность сельскохозяйственных культур в зависимости от удобрений на основе *ОСВ*

Вариант	Урожайность, ц з.е./га	Прибавка	
		ц з.е./га	% к контролю
Лен-долгунец, среднее за 3 года			
Контроль без удобрения	13.6	–	–
Компост 2 т/га	14.6	1.0	7.4
Компост 4 т/га	15.8	2.2	10.2
Компост 6 т/га	17.0	3.4	25.0
НРК	15.4	1.8	13.3
НРК + компост 2 т/га	17.1	3.5	25.8
ОМУГ 4 т/га	18.8	5.2	38.3
<i>НСР</i> <sub>05</sub>	0.9		
Картофель, среднее за 3 года			
Контроль без удобрения	46.8	–	–
Компост 2 т/га	48.8	2.0	4.3
Компост 4 т/га	49.5	2.7	5.8
Компост 6 т/га	53.3	6.5	13.9
НРК	48.5	1.7	3.7
НРК + компост 2 т/га	50.3	3.5	7.5
ОМУГ 4 т/га	56.0	9.2	19.7
<i>НСР</i> <sub>05</sub>	2.1		
Ячмень, среднее за 3 года			
Контроль без удобрения	17.1	–	–
Компост 2 т/га	17.8	0.7	4.1
Компост 4 т/га	18.5	1.4	8.2
Компост 6 т/га	19.3	2.2	12.9
НРК	17.5	0.4	2.4
НРК + компост 2 т/га	18.1	1.0	5.9
ОМУГ 4 т/га	21.8	4.7	27.5
<i>НСР</i> <sub>05</sub>	2.1		



**Рис. 1.** Прибавки урожайности сельскохозяйственных культур звена полевого севооборота лен-долгунец–картофель–ячмень в зависимости от удобрений на основе *ОСВ*, среднее за год.

(картофеля и ячменя) испытывали их последствие.

Схема полевого опыта включала варианты: 1 – без удобрений (контроль), 2 – компост из *ОСВ* и торфа в дозе 2 т/га, 3 – компост в дозе 4 т/га, 4 – компост в дозе 6 т/га, 5 – NPK в дозе, эквивалентной дозе компоста 4 т/га (минеральная система), 6 – компост в дозе 2 т/га + NPK в дозе, эквивалентной дозе компоста 2 т/га (органоминеральная система), 7 – органоминеральное удобрение ОМУГ в дозе 4 т/га. Варианты 5 и 6 по содержанию NPK были эквивалентны варианту 3.

Продуктивность звена севооборота за годы опыта в среднем в 3-х полях достигала наибольших величин при внесении высокой дозы компоста из *ОСВ* и торфа и удобрения ОМУГ: соответственно 29.9 и 32.2 ц з.е./га, что на 15.9 и 24.8% превышало контроль (табл. 4, рис. 1). В варианте с органоминеральной системой (компост 2 т/га + NPK, эквивалентно дозе компоста 2 т/га) продуктивность звена находилась на уровне 28.5 ц з.е./га, прибавка к контролю была равна 10.5%. Недостоверными оказались прибавки от одних минеральных удобрений и компоста при самой низкой дозе.

При анализе воздействия различных вариантов удобрения на продуктивность агроценозов по отдельным годам опыта (табл. 5) наибольший эффект в среднем за 3 года отмечен при возделывании первой культуры звена – льна-долгунца в варианте с удобрением ОМУГ, когда прибавка составила 38.3%. В первый год последствия ОМУГ при выращивании картофеля также была получена достоверная прибавка, но она снизи-

лась до 19.7%. На 2-й год последствия ОМУГ, при возделывании ячменя существенная прибавка урожая достигала 27.5%. Последствие компоста (*ОСВ* + торф) и одних минеральных удобрений было очень слабым.

При анализе действия и последствия удобрений на содержание тяжелых металлов в растительной продукции четких закономерностей не отмечено (табл. 6). В семенах и соломе льна, клубнях картофеля, зерне и соломе ячменя содержание тяжелых металлов в вариантах с удобрениями было на уровне или даже меньше контроля.

Компосты на основе осадков сточных вод, удобрение ОМУГ и минеральные удобрения незначительно повлияли на агрохимические свойства почвы (табл. 7). В конце опыта в вариантах с компостами, а также при внесении удобрения ОМУГ наблюдали тенденция к повышению содержания подвижного фосфора. В то же время количество подвижного калия в почве во всех вариантах опыта уменьшалось из-за низкой обеспеченности им *ОСВ*. Исключение составил только вариант с удобрением ОМУГ, при производстве которого в качестве добавки использовали калийные удобрения (5% д.в.).

Применение удобрений на основе *ОСВ* не вызывало загрязнения тяжелыми металлами и мышьяком почвы, о чем свидетельствовали данные об их валовом содержании, полученные в конце ротации звена севооборота после уборки ярового ячменя (табл. 8). Во всех вариантах опыта не было отмечено превышения ПДК (ОДК), а суммарное загрязнение почвы было значительно меньше допустимого уровня, определенного отечественны-

**Таблица 6.** Содержание тяжелых металлов и мышьяка в растительной продукции, мг/кг сухого вещества

Вариант	Cu	Zn	Pb	Cd	Ni	Cr	Mn	Co	Hg	As
Лён-долгунец (солома)										
Контроль	1.9	18.4	0.53	0.28	0.50	0.6	19.2	0.11	0.01	0.08
Компост 2 т/га	1.7	17.8	0.57	0.26	0.39	0.5	18.0	0.13	0.01	0.13
Компост 4 т/га	1.8	16.4	0.51	0.23	0.46	0.5	16.8	0.07	0.01	0.07
Компост 6 т/га	1.7	14.7	0.66	0.24	0.56	0.6	15.7	0.10	0.01	0.13
НРК	1.7	14.8	0.56	0.25	0.42	0.5	17.1	0.11	0.01	0.08
НРК + компост 2 т/га	1.5	13.2	0.56	0.20	0.39	0.7	15.8	0.06	0.01	0.11
ОМУГ 4 т/га	1.7	14.0	0.51	0.25	0.39	0.8	18.5	0.24	0.01	0.06
Лён-долгунец (семена)										
Контроль	9.2	42.1	0.90	0.13	0.79	0.4	15.5	0.16	0.01	0.05
Компост 2 т/га	6.4	35.9	0.72	0.09	0.58	0.3	13.2	0.13	0.01	0.07
Компост 4 т/га	10.6	44.4	0.88	0.11	0.74	0.3	13.7	0.16	0.01	0.06
Компост 6 т/га	10.0	47.9	1.09	0.13	0.86	0.4	20.7	0.10	0.01	0.05
НРК	7.1	48.3	0.94	0.14	1.04	0.4	16.9	0.14	0.01	0.1
НРК + компост 2 т/га	5.6	35.3	0.68	0.10	0.81	0.2	18.5	0.16	0.01	0.05
ОМУГ 4 т/га	8.9	41.9	0.75	0.13	1.14	0.3	15.3	0.15	0.01	0.04
Картофель (клубни)										
Контроль	1.4	7.1	0.37	0.027	0.21	0.15	4.2	0.08	0.01	0.02
Компост 2 т/га	1.2	7.5	0.33	0.027	0.16	0.12	4.4	0.05	0.01	0.03
Компост 4 т/га	1.2	7.5	0.28	0.025	0.22	0.14	5.0	0.04	0.01	0.02
Компост 6 т/га	1.2	5.8	0.33	0.020	0.09	0.16	4.6	0.04	0.01	0.02
НРК	1.4	8.2	0.30	0.021	0.18	0.18	6.5	0.03	0.01	0.02
НРК + компост 2 т/га	1.1	6.6	0.42	0.022	0.20	0.17	5.5	0.05	0.01	0.02
ОМУГ 4 т/га	1.2	8.4	0.29	0.030	0.25	0.13	4.5	0.05	0.01	0.02
Ячмень (зерно)										
Контроль	2.8	18.1	0.09	0.021	0.24	0.43	2.1	0.09	0.005	0.021
Компост 2 т/га	2.9	29.0	0.10	0.024	0.17	0.36	2.6	0.06	0.004	0.022
Компост 4 т/га	2.4	16.0	0.07	0.014	0.13	0.23	2.0	0.05	0.004	0.021
Компост 6 т/га	3.2	23.2	0.06	0.019	0.25	0.26	2.6	0.06	0.004	0.019
НРК	3.0	26.1	0.07	0.023	0.22	0.32	2.5	0.06	0.004	0.030
НРК + компост 2 т/га	3.4	23.3	0.11	0.024	0.19	0.36	3.3	0.67	0.004	0.024
ОМУГ 4 т/га	2.4	21.5	0.07	0.026	0.21	0.29	3.1	0.06	0.004	0.024
Ячмень (солома)										
Контроль	2.2	10.0	0.28	0.024	0.27	0.37	9.3	0.17	0.005	0.018
Компост 2 т/га	2.1	11.4	0.18	0.021	0.16	0.28	6.4	0.16	0.004	0.020
Компост 4 т/га	1.8	8.9	0.25	0.027	0.24	0.37	6.6	0.14	0.004	0.024
Компост 6 т/га	1.2	6.3	0.15	0.022	0.18	0.19	6.8	0.10	0.004	0.018
НРК	1.3	6.0	0.24	0.021	0.24	0.42	5.3	0.13	0.004	0.022
НРК + компост 2 т/га	1.6	8.8	0.22	0.016	0.23	0.34	7.5	0.10	0.004	0.013
ОМУГ 4 т/га	2.1	12.2	0.21	0.025	0.22	0.37	9.1	0.15	0.004	0.024
МДУ 123-4/281-87	30.0	50.0	5.0	0.3	3.0	0.5	—	1.0	0.05	0.5

**Таблица 7.** Влияние удобрений на основе *ОСВ* на агрохимические свойства почвы

Вариант	Гумус, %	рН <sub>KCl</sub> , ед.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
			мг/кг	
Исходное содержание в почве	3.9	5.3	228	119
Без удобрений (контроль)	3.2	5.3	236	112
Компост 2 т/га	3.2	5.3	240	117
Компост 4 т/га	3.1	5.3	243	125
Компост 6 т/га	3.0	5.4	236	119
НРК	3.0	5.1	224	124
НРК + компост 2 т/га	3.1	5.2	224	117
ОМУГ 4 т/га	2.8	5.1	247	149

**Таблица 8.** Валовое содержание тяжелых металлов и мышьяка в почве в зависимости от удобрений на основе *ОСВ*, мг/кг

Вариант	Cu	Zn	Pb	Cd	Ni	Cr	Hg	As
Контроль	5	24	6	0.3	10	8.5	0.03	2.2
Компост 2 т/га	5	23	5	0.4	9	8.6	0.02	2.1
Компост 4 т/га	5	24	5	0.3	9	8.0	0.02	2.4
Компост 6 т/га	5	23	5	0.4	9	8.2	0.02	2.0
НРК	6	25	6	0.4	9	7.9	0.03	2.1
НРК + компост 2 т/га	6	24	6	0.4	10	8.2	0.03	2.0
ОМУГ 4 т/га	6	24	5	0.4	9	7.8	0.03	1.9
ПДК/ОДК	66	110	65	1.0	40		2.1	5

**Таблица 9.** Влияние удобрения ОМУГ на урожайность картофеля

Вариант	Урожайность, т/га	Прибавка урожая	
		т/га	% к контролю
Контроль, без удобрений	27.7	—	—
ОМУГ 3.3 т/га локально (лентой)	32.1	4.4	15.9
<i>HCP</i> <sub>05</sub> , т/га	2.5		

ми нормативами. Таким образом, использование всех примененных в опыте удобрений на основе *ОСВ* не приводило к существенному загрязнению тяжелыми металлами растительной продукции и почвы.

В целом наилучшие результаты по применению *ОСВ* под сельскохозяйственные культуры

отмечены при внесении компоста из осадков и торфа в дозе 6 т/га, а также органо-минерального удобрения ОМУГ в дозе 4 т/га, применение которых обеспечило достоверное по сравнению с контролем повышение урожайности льна-долгунца и последующих культур — картофеля и ячменя. В растительной продукции льна-долгунца, картофеля, ярового ячменя содержание тяжелых металлов в вариантах с удобрениями на основе *ОСВ* находилось на уровне контроля и не превышало требований безопасности.

В другом полевом эксперименте, проведенном на Полевой станции РГАУ—МСХА им. К.А. Тимирязева, также была установлена высокая агрономическая эффективность удобрения ОМУГ при возделывании картофеля сорта Ред Скарлет. При внесении ОМУГ 3.3 т/га с влажностью 10% или сухой массы 3 т/га, урожайность клубней составила 32.1 т/га, что было достоверно больше контроля (табл. 9, рис. 2). На 1 т внесенного удобрения ОМУГ натуральной влажности было дополнительно получено 1.33 т клубней картофеля, а на 1 кг азота, содержащегося во внесенном удобрении, — 20 кг з.е. при обычной окупаемости удобрений не более 10 кг з.е., что свидетельствовало о высокой эффективности созданного органо-минерального удобрения.

В научно-производственном опыте по изучению эффективности почвогрунтов из *ОСВ* к моменту учета урожая тестовой культуры — овса в фазе выхода в трубку оба грунта оказали положительное влияние на его биомассу (табл. 10). При применении почвогрунтов как марки А, так и марки Б, получены достоверные прибавки биомассы. Зеленая масса овса в варианте с почвогрунтом марки А составила 240, марки Б — 276 ц/га. Разница в урожайности между этими вариантами оказалась статистически недостоверной. В то же время по урожайности биомассы варианты с применением почвогрунтов обеих марок превосходили контроль (естественный почвогрунт) в 3.6–4.3 раза. Показатели структуры урожая (высота растений, количество стеблей на 1 м<sup>2</sup>) в вариантах с почвогрунтами на основе *ОСВ* также превосходили естественный контроль.

Таким образом, переработка осадков городских сточных вод при смешивании их с песком, а при создании почвогрунта марки Б — и с минеральными удобрениями, явилась эффективным приемом, обеспечивающим при использовании в качестве грунтов достоверное повышение урожайности овса на зеленую массу по сравнению с естественным грунтом. Высокая урожайность овса и состояние его наземной биомассы свидетельствовали об отсутствии негативного влияния



Рис. 2. Влияние органо-минерального удобрения ОМУГ на урожайность клубней картофеля.

ОСВ, входящих в почвогрунты, на рост и развитие растений.

Результаты исследования влияния удобрений на основе осадка сточных вод (ОСВ) на почву и растения показали, что их применение на опустошенных пожарами лесных массивах может иметь большое народнохозяйственное значение для восстановления биологических экосистем. При этом за счет внесения осадков сточных вод на пораженных пожарами лесных участках могут быть успешно решены две актуальные проблемы – утилизация осадков и рекультивация опустошенных пожарами массивов. Для решения этих проблем был предложен инновационный способ восстановления естественной растительности путем применения ОСВ на пораженных пожарами участках, изложенный в патенте на изобретение № 2706158 [12]. Применение ОСВ по разработанным технологиям повышало плодородие почв, урожайность сельскохозяйственных культур на 20–40%, способствовало улучшению их качества,

не вызывая существенного негативного влияния на санитарно-гигиенические свойства получаемой продукции. Положительное воздействие на экосистемы применение ОСВ может также оказать в зеленом строительстве и при восстановлении пораженной пожарами лесостарниковой растительности. По расчетам, при внесении ОСВ на площадях, опустошенных лесными пожарами, в дозах, согласно СанПиН 2.1.7.573–96, сухого вещества 7–10 т/га на 1 млн га потребуется до 10 млн т осадков. Таким образом, на каждый 1 млн рекультивируемой площади будет использован практически 3-летний объем образующихся в стране ОСВ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целесообразность рационального использования ОСВ в качестве удобрения подтверждается документом “Международный кодекс поведения в области устойчивого использования удобрений и управления ими” [4]. В нем, в частности, указано, что к потенциальным источникам питательных веществ из повторно используемых и вторично переработанных материалов относятся сточные воды, осадок сточных вод и другие неорганические и органические побочные продукты, которые можно применять для целей растениеводства и это должно подтверждаться на основе научных данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочная книга по производству и применению органических удобрений. Владимир: ВНИП-ТИОУ, 2001. 495 с.
2. Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я. Направленность и интенсивность потоков азота при эко-

Таблица 10. Влияние почвогрунтов “Ульянинский” марок А и Б на урожайность зеленой массы овса в научно-производственном опыте

Вариант	Урожайность, ц/га	Прибавка	
		ц/га	больше контроля, раз
Контроль, естественный грунт	52	–	–
Почвогрунт “Ульянинский” марки А	240	188	3.6
Почвогрунт “Ульянинский” марки Б	276	224	4.3
НСР <sub>05</sub>	68		

- логизации и биологизации земледелия // Мат-лы Всерос. совещ. научн. учреждений-участников Географической сети опытов с удобрениями “75 лет Географической сети опытов с удобрениями”. М.: ВНИИА, 2016. С. 102–107.
3. *Агрохимия: Классический университетский учебник для стран СНГ / Под ред. Минеева В.Г.* М.: ВНИИА, 2017. 854 с.
  4. *Международный кодекс поведения в области устойчивого использования удобрений и управления ими.* Рим, 23–29 июня 2019 г.
  5. *Маврина Н.Ф.* Экологическая оценка осадков сточных вод и обоснование возможности их использования в лесных питомниках: Автореф. дис. ... канд. биол. Наук. М., 2001. 21 с.
  6. *Мерзлая Г.Е., Афанасьев Р.А.* Трансформация токсичных осадков сточных вод в экологически безопасные удобрения // *Хим. безопасность.* 2018. Т. 2. № 1. С. 180–190.
  7. *Санитарные правила и нормы СанПиН 2.1.7.573-96 “Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения”.* М.: Минздрав РФ, 1997. 54 с.
  8. *Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений.* ГОСТ Р 17.4.3.07-2001.
  9. *Удобрения органические на основе осадков сточных вод.* Техн. условия. ГОСТ Р 54651-2011.
  10. *Стратегия использования осадков сточных вод и компостов на их основе в агрикультуре / Под ред. Милащенко Н.З.* М.: Агроконсалт, 2002. 138 с.
  11. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов наблюдений). М.: Колос, 1965. 335 с.
  12. *Сычев В.Г., Афанасьев Р.А., Мерзлая Г.Е., Смирнов М.О.* Патент на изобретение № 2706158. Способ рекультивации земель под древесно-кустарниковой растительностью, пораженной лесными пожарами. Приоритет изобр. 08 июля 2019 г.

## Agrochemical Aspects of Using Sewage Sludge for Reclamation of Land for Various Purposes

**G. E. Merzlaya<sup>a,#</sup> and R. A. Afanasev<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: lab.organic@mail.ru*

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

As a result of research carried out in two field and research and production experiments with fertilizers based on sewage sludge, it was found that the organic and mineral ingredients contained in them are valuable nutrients for biocenoses. Sewage sludge that meets sanitary and hygienic standards has a positive effect on the productivity and quality characteristics of cultivated crops and can be used as fertilizers in agriculture, as well as in urban landscaping. They can be particularly important for restoring ecosystems when forest and shrub vegetation is affected by fires.

*Key words:* sewage sludge, chemical composition and fertilizing value, biocenoses, efficiency, methods of using sewage sludge.

УДК 58.02-04:54.07

## ВЛИЯНИЕ ВОДЫ, ОБРАБОТАННОЙ ПЛАЗМОЙ, НА РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ

© 2020 г. М. Ю. Андрианова<sup>1,\*</sup>, С. В. Коротков<sup>2</sup>, Д. А. Коротков<sup>2</sup>, Г. Л. Спичкин<sup>3</sup><sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, Россия<sup>2</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН  
194021 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26, Россия<sup>3</sup> ООО НПО «Фитотехнология»  
195220 Санкт-Петербург, ул. Гжатская, 27 лит. А, Россия

\*E-mail: andrianova\_myu@spbstu.ru

Поступила в редакцию 05.12.2019 г.

После доработки 06.02.2020 г.

Принята к публикации 11.05.2020 г.

Приведены результаты исследования свойств воды, обработанной электроразрядной низкотемпературной плазмой. Описана экспериментальная установка, позволяющая на частоте до 500 Гц инициировать разряды в воде импульсами напряжения с амплитудой ~30 кВ и фронтом ~8 мкс и формировать микросекундные импульсы разрядного тока с амплитудой ~400 А и фронтом ~150 нс. Показано, что при сравнительно малом времени плазменной обработки (2–3 мин) в объеме воды ~0.7 л образуются азотная и азотистая кислоты с концентрацией до 7.5 мг N/л, обеспечивающие снижение pH до 3.5 ед., и короткоживущие окислители с концентрацией 2.5–3.0 мМ-экв/л, повышающие окислительно-восстановительный потенциал воды до +610 мВ. Установлено, что инкубация в плазменной воде стимулировала прорастание семян гороха по сравнению с водопроводной водой. Полив грунта плазменной водой увеличивал выход массы плодовых тел грибов-вешенок (*Pleurotus ostreatus*). Стимулирующего действия плазменной воды на рост корней лука-севка не обнаружено.

**Ключевые слова:** вода, обработанная плазмой, развитие растений, тест-культуры, горох, лук-севок, гриб вешенка (*Pleurotus ostreatus*).

**DOI:** 10.31857/S0002188120080037

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время интенсивно исследуют влияние низкотемпературной плазмы, формируемой под действием электрических разрядов, что находит применение в разных областях, в том числе и в сельском хозяйстве. На различных культурах показано, что в результате обработки семян в газоразрядной плазме увеличивается их всхожесть, энергия прорастания, темпы роста, устойчивость к болезням, урожайность растений [1–5]. Эти эффекты объясняются действием на семена ультрафиолетового излучения, электрических и магнитных полей, а также атомов, ионов и радикалов с высокой реакционной способностью, образующихся в плазме.

Другое направление исследований состоит в изучении действия на растения воды, обработанной плазмой. Широкое распространение получили импульсные технологии плазменной обработки при создании высоковольтных разрядов в сре-

де, содержащей компоненты воды и воздуха. При их использовании, помимо эффектов, вызванных короткоживущими веществами с высокой реакционной способностью (таких как •ОН, НО<sub>2</sub>, Н<sub>2</sub>О<sub>2</sub>, атомарные кислород и водород, и др.) [6], следует также учитывать действие образующихся биологически доступных соединений азота (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> и NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) [7–9].

Состав воды после плазменной обработки зависит от параметров электроразрядной плазменной установки и режима обработки. Плазменные установки отличаются по типу используемого разряда (барьерного, искрового, коронного, дифрагменного и др.), по длительности импульсов разрядного тока (микросекундного, наносекундного), по форме и расположению электродов (игл, цилиндров, колец, трубочек и др.), а также по величине и форме инициирующего разряда высокого напряжения и организации подачи воды и воздуха. Важной характеристикой является также

длительность обработки воды, требующаяся для достижения желаемого эффекта. Она может составлять от единиц до десятков минут в зависимости от параметров установки [6, 8, 9].

Цель работы – изучение химического состава плазменной воды, полученной в опытной электроразрядной плазменной установке на основе генератора высоковольтных импульсов [10], и ее влияния на развитие растений и грибов.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработанная установка имела ряд характерных особенностей. Разряды создавались в заполненной водой многоэлектродной разрядной камере с объемом ~1 л. После пробоя межэлектродных промежутков в разряд вкладывалась сравнительно небольшая энергия ~1 Дж, исключая возможность образования мощных ударных волн, способных разрушить стенки камеры, выполненные из оргстекла. Частота следования разрядов была высокой (до 500 Гц), при этом в процессе обработки воды достигалась достаточно большая скорость образования низкотемпературной плазмы.

Система электродов камеры состояла из верхнего потенциального дискового электрода с диаметром 24 мм, выполненного из молибдена, и 6-ти заземленных электродов в виде тонкостенных трубок из нержавеющей стали с наружным диаметром 3 мм, которые были равномерно распределены под краевой поверхностью дискового электрода. На электроды от генератора подавали импульсы высокого напряжения, нарастающие со скоростью ~4 кВ/мкс до максимальной величины 33 кВ.

Через трубчатые заземленные электроды в камеру подавали атмосферный воздух от компрессора. При этом в воде формировались потоки воздушных пузырьков. Расход воздуха выбирали так, чтобы пузырьки были отделены друг от друга прослойками воды. Образующиеся пузырьковые кластеры пробивались при приложении импульса высокого напряжения. В результате в межэлектродных промежутках развивались искровые разряды.

Суммарный ток разряда за время ~150 нс достигал амплитудного значения ~400 А. Малое сопротивление каналов разряда определяло сравнительно большое время рассеивания вводимой в разряд энергии (несколько мкс). Выходная цепь генератора обеспечивала униполярную форму тока разряда.

Наличие пузырьков обеспечило устойчивый пробой воды при межэлектродном расстоянии 1.2–1.5 см. При работе на частоте визуальное наблюдение через прозрачные стенки камеры свидетельствовало о том, что разряды имеют примерно одинаковую интенсивность и образуют плазменные конусы, расположенные по периметру дискового электрода. Достаточно большое межэлектродное расстояние и равномерное распределение плазмы по периметру дискового электрода позволяло обработать большой объем воды, находящийся в зоне разряда.

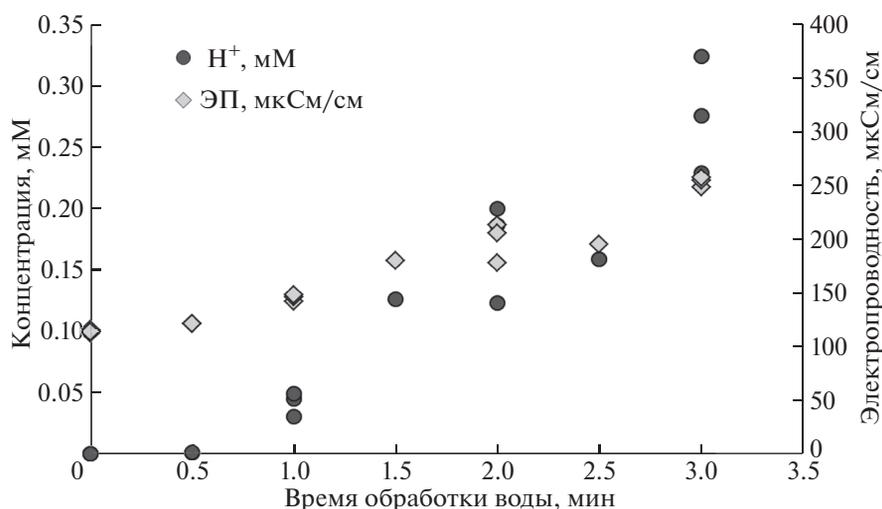
Воду для плазменной обработки отбирали в 5-литровую емкость из водопроводного крана и выдерживали перед обработкой несколько часов для достижения комнатной температуры. Перед отбором воду из крана пропускали в течение 5 мин, чтобы предварительно вымыть продукты коррозии из труб. Длительность плазменной обработки воды составляла до 3 мин. Одновременно обрабатывали ~0.7 л воды, залитой в разрядную камеру.

Электропроводность воды измеряли портативным кондуктометром HANNA HI 8733 (Hanna Instruments, Austria) (погрешность определения  $\pm 5\%$ ). Измерение pH воды проводили на pH-метре-иономере И-500 (Аквилон, Россия) (погрешность определения  $\pm 0.05$  ед pH). Редокс-потенциал воды измеряли электродом DMI 140-SG (погрешность определения  $\pm 15\%$ ).

Йодометрию окислителей в воде проводили по методике, описанной в ГОСТ 1801-72 “Вода питьевая. Методы определения содержания остаточного озона”. Вытеснение йода из раствора йодида калия в условиях этой методики происходит не только под действием озона, но также нитритов, железа и других окислителей. На случай их мешающего влияния в методике предусмотрено предварительное вытеснение озона воздухом из исследуемой воды в другой сосуд с раствором для последующей йодометрии. В плазменной воде после вытеснения озона обнаружен не был. Следовательно, при йодометрии вытеснение йода происходило под действием иных окислителей.

Железо общее в воде измеряли по ГОСТ 4011-72 с сульфосалициловой кислотой. Фотометрирование окрашенных растворов проводили на спектрофотометре КФК-3-01 (ЗОМЗ, Москва), кювета 1 см, длина волны 425 нм. Погрешность определения  $\pm 14\%$ . Нитраты и нитриты в воде определяли методом капиллярного электрофореза по методике М 01-30-2009 (ПНД Ф 14.1:2.4.157-99). Погрешность определения  $\pm 15\%$ .

Содержание общего органического углерода и общего азота определяли на анализаторах ТОС-Lcpn и



**Рис. 1.** Изменение концентрации ионов водорода и электропроводности в зависимости от времени плазменной обработки воды.

TNM-L (Шимадзу, Япония). Погрешность определения  $\pm 15\%$ .

Тестирование плазменной воды и других растворов на корнях лука (*Allium*-тест) проводили по методике [11]. Донца лука-севка сорта Штургартен инкубировали в исследованных растворах. Дважды в день подливали по 1–2 мл воды в пробирки для инкубации. Растворы полностью обновляли после 2-х и 3-х сут инкубации, измерения длины корней проводили через 4 сут после начала теста. *Allium*-тест проводили в трехкратной повторности, в каждой повторности брали по 10 луковиц.

Эксперименты с семенами проводили с использованием семян гороха сорта Никитка. Для прорастивания семена раскладывали в открытых сосудах на ткань, пропитанную водой, и оставляли при комнатной температуре. Ежедневно в сосуды подливали одинаковое количество воды для пропитки ткани. Опыт проводили в четырехкратной повторности, в каждой повторности брали серию из 50 семян гороха. Для дальнейшего выращивания проросших семян гороха использовали почвогрунт “Цветочный” (ООО “Кушавераторф”, рН 5.5–6.5, содержание элементов питания не менее: N – 100, K<sub>2</sub>O – 250, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – 200 мг/л).

Также проверили действие водопроводной воды, обработанной плазмой, на рост плодовых тел грибов. Использовали покупные наборы, состоящие из спор вешенки и грунта для выращивания грибов производства фирмы “Золотой урожай” ([www.eco-gribi.ru](http://www.eco-gribi.ru)). Споры перемешивали с грунтом согласно рекомендациям изготовителя и поливали водопроводной водой (контроль) и плаз-

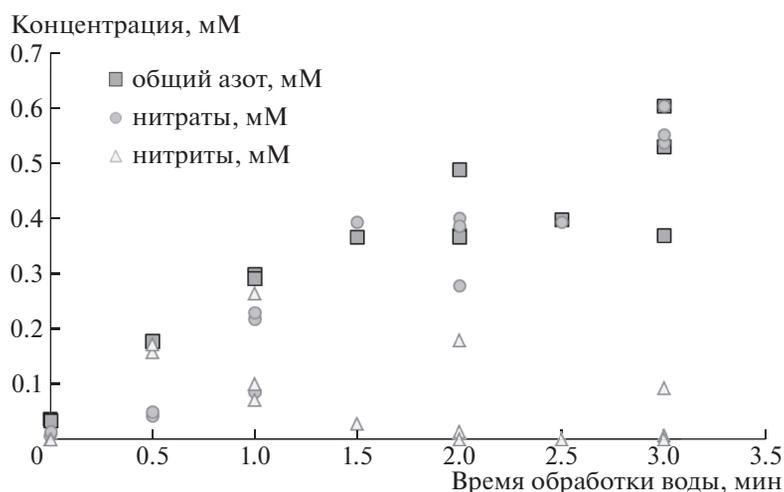
менной водой в течение 3 мес. Для каждого варианта полива использовали по 5 грибных наборов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки содержания биогенных элементов в воде был проведен ее химический анализ. Содержание общего органического углерода в воде до и после обработки не менялось и составило 4 мг/л. Таким образом, полного разрушения органических веществ в результате обработки воды не происходило.

Содержание железа общего в необработанной водопроводной воде составляло 0.2–0.5 мг Fe/л, а после обработки плазмой в течение 2–3 мин оно составило 3–5 мг Fe/л. Поступление железа в воду объясняется коррозией электродов при разряде. Значительная часть железа общего (>80%) была представлена взвесью, оседающей в течение нескольких часов.

По мере увеличения времени обработки воды ее электропроводность увеличивалась от 110 до 320 мкСм/см, рН снижался от 7.2 до 3.4 (результаты частично представлены на рис. 1). В воде также росла концентрация общего азота (от 0.5 до 7.5 мг N/л), нитратов и нитритов (рис. 2). Это свидетельствовало об образовании азотной и азотистой кислот в результате взаимодействия азота воздуха с кислородом и водой под действием высоковольтных разрядов, что сходно с процессами абиотической фиксации азота в атмосфере [12]. Молярная концентрация ионов водорода в изученных в работе пробах была меньше суммы молярных концентраций нитратов и нитритов, что



**Рис. 2.** Изменение концентраций общего азота, нитрат- и нитрит-ионов в зависимости от времени плазменной обработки воды.

указывало на частичную нейтрализацию образовавшихся кислот примесями воды.

Образование азотной и азотистой кислот типично для плазменной обработки воды [9]. В некоторых установках после плазменной обработки в воде регистрируются также ионы аммония [8]. В нашем случае их обнаруживали только в воде до обработки в количестве  $0.1 \text{ мг NH}_4^+/\text{л}$ , что объясняется применением сульфата аммония на водопроводных станциях Санкт-Петербурга при дезинфекции (хлорирование с аммонизацией [13]). Содержание общего азота (аммонийного и нитратного) в воде до обработки не превышало  $0.6 \text{ мг N}/\text{л}$ .

Результаты показали (рис. 1), что приблизительно отслеживать количество образующихся веществ (и устанавливать длительность обработки) можно по увеличению электропроводности воды. Однако рост концентраций общего азота замедлялся после обработки в течение 2–3 мин, поэтому более длительная обработка воды была нецелесообразной с точки зрения получения большего количества доступного для растений азота.

Некоторые пробы воды с одинаковым временем плазменной обработки сильно отличались по концентрации нитритов (рис. 2). Это объясняется тем, что химический анализ воды в разных повторностях опыта проводили спустя разное время. Если пробы анализировали методом капиллярного электрофореза в течение 1–2 ч после плазменной обработки, то в них регистрировали и нитриты, и нитраты. Если же химический анализ пробы выполняли спустя 1–2 сут, то в пробах обнаруживали только нитраты. Вероятно, происходило окисление нитритов до нитратов за счет

кислорода воздуха или окислителей, образовавшихся в воде в результате плазменной обработки.

Для оценки содержания окислителей в воде, обработанной в течение 2.5 мин, определяли редокс-потенциал и проводили йодометрию спустя разное время после хранения воды при комнатной температуре. В тех же пробах определяли pH и электропроводность.

В первые 10–20 мин после плазменной обработки редокс-потенциал воды был положительным и составлял 590–610 мВ, в течение 1 сут он снижился до 440–510 мВ и спустя несколько сут доходил до 350–415 мВ (рис. 3). Электропроводность и pH воды за это время менялись в пределах погрешности измерения.

Известно, что на величину редокс-потенциала влияет содержание растворенного кислорода, а в хорошо аэрированной природной воде редокс-потенциал составляет от 300 до 500 мВ [14]. В настоящем исследовании были зарегистрированы показатели выше верхней границы этого диапазона. Для сравнения приготовили аэрированную водопроводную воду, через которую пропускали воздух как при плазменной обработке, но без подачи напряжения на электроды. В ней сразу после обработки редокс-потенциал составил 460–470 мВ, спустя час он уменьшился до 320 мВ и далее сохранялся примерно на том же уровне. Таким образом, полученные данные подтвердили образование при плазменной обработке быстрорастворимых веществ, обеспечивших в начале повышение редокс-потенциала воды.

Результаты согласовались с литературными данными, например, в работе [15] обрабатывали дистиллированную воду диэлектрическим ба-

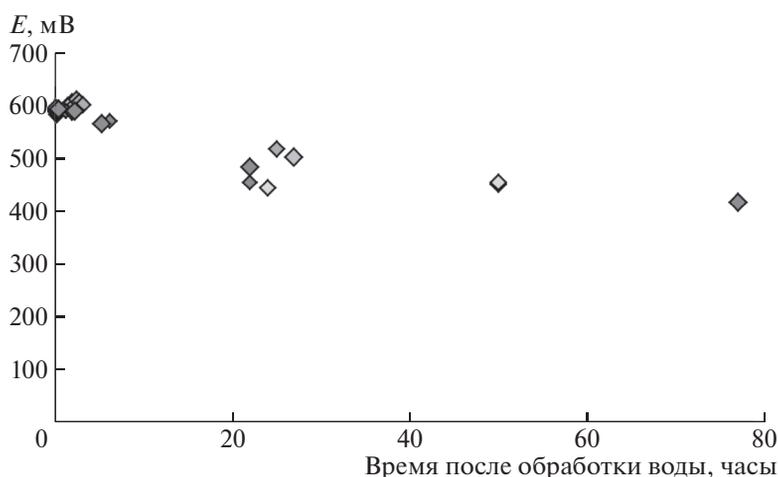


Рис. 3. Изменение редокс-потенциала (E) воды после плазменной обработки.

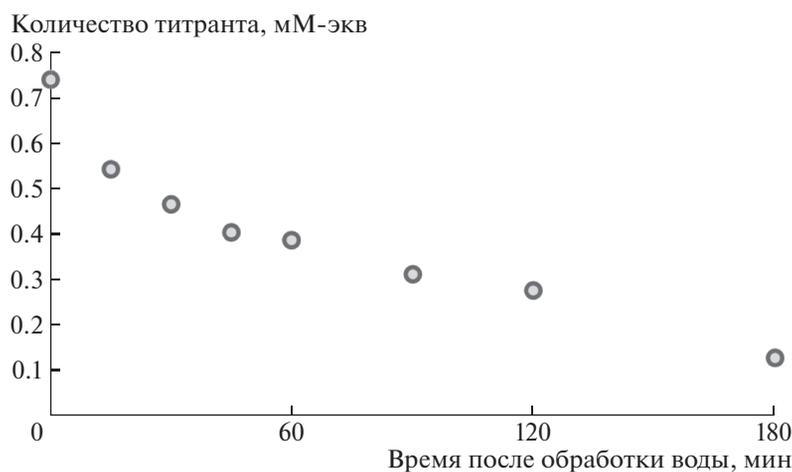


Рис. 4. Изменение количества йода, вытесненного окислителями после плазменной обработки воды. Количество титранта (тиосульфата натрия) равно количеству йода, мМ-экв/л.

рьерным разрядом в потоке воздуха над поверхностью воды, при этом редокс-потенциал воды возрос с 300 до 600 мВ. В другой работе [16] был получен иной результат: в отсутствии аэрирования в установке редокс-потенциал воды снижался с 460 до 45 мВ, что объясняли образованием водорода под действием разрядов.

Йодометрия позволяет регистрировать окислители, способные вытеснить йод из йодида калия, т.е. окислители с потенциалом  $>536$  мВ. По данным проведенной в работе йодометрии, в воде, обработанной плазмой, сразу после обработки регистрировали содержание окислителей 2.5–3.0 мМ-экв/л. Их количество уменьшалось в 2 раза в течение первого часа после обработки (рис. 4) и сходило на нет в течение 1 сут. В аэрированной водопроводной воде вытеснение йода не регистрировали. Судя по величинам стандарт-

ных окислительно-восстановительных потенциалов [17], к числу возможных окислителей относятся  $\text{HO}_2^\cdot$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{OH}^\cdot$ , атомарный  $\text{O}$ , а также  $\text{HNO}_2$  и, возможно, другие азотсодержащие соединения. Проведенные опыты на модельных растворах показали, что в условиях использованной методики нитраты натрия (11 мг N/л) не вытесняют йод, а нитриты натрия (0.7–13 мг N/л) — вытесняют, причем у последних количество вытесненного йода спустя несколько часов такое же, как и сразу после приготовления раствора. Таким образом, быстрое разрушение нитритов в обработанной воде (зарегистрированное по данным капиллярного электрофореза и описанное выше) происходит не за счет их взаимодействия с кислородом воздуха, а благодаря образовавшимся другим окислителям.

Таблица 1. Результаты *Allium*-теста

Параметр	Варианты					
	T1	T2	T3	P1	P2	P3
Число корней (среднее на луковицу), шт	30	12	33	14	32	29
Средняя длина корня, мм	22	4	20	4	19	16
Стандартное отклонение длины корней, мм	14	2	12	2	10	9
Суммарная длина корней (средняя для луковицы), мм	699	51	665	56	628	451

Примечание. T1 – водопроводная вода, pH 6.80, T2 – водопроводная вода с добавлением HNO<sub>3</sub> до pH 3.55, T3 – водопроводная вода с добавлением ~20 мг Ca(OH)<sub>2</sub>/л и HNO<sub>3</sub> до pH 6.80, P1 – плазменная вода, pH 3.50, P2 – плазменная вода, нейтрализованная Ca(OH)<sub>2</sub> до pH 6.80, P3 – плазменная вода, нейтрализованная Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> до pH = 6.74.

Таблица 2. Результаты проращивания семян гороха

Вариант	Продолжительность проращивания, сут								
	3-и			4-е			5-е		
	n	l	Sl	n	l	Sl	n	l	Sl
1	0	0	0	4	7	27	42	10	396
2	0	0	0	38	9	352	50	19	933
3	0	0	0	23	7	169	44	15	673
4	8	7	60	40	14	550	50	32	1598

Примечания. 1. Варианты: 1 – семена инкубировали в водопроводной воде (контроль), 2 – семена инкубировали в свежей плазменной воде, обработанной 3 мин, 3 – семена инкубировали в растворе 5 мг HNO<sub>3</sub>/л, приготовленном на водопроводной воде, 4 – семена предварительно обрабатывали в разрядной камере (3 мин) и затем инкубировали в свежей плазменной воде, обработанной 3 мин. То же в табл. 3. 2. n – количество проросших семян гороха (среднее для 50-ти семян), l – средняя длина корня, мм, Sl – суммарная длина корней в варианте, мм.

Для выяснения действия воды, обработанной плазмой, на сельскохозяйственные культуры, были проведены опыты на растениях и грибах. Для изучения влияния на корни растений был поставлен *Allium*-тест. Поскольку известно ингибирующее влияние низкого pH на рост корней лука [11], были сделаны соответствующие контроли и растворы нейтрализованной плазменной воды. Все растворы были приготовлены за 1 сут до начала теста. Тестировали следующие растворы: T1 – водопроводная вода, pH 6.80, T2 – водопроводная вода с добавлением HNO<sub>3</sub> до pH 3.55, T3 – водопроводная вода с добавлением ~20 мг Ca(OH)<sub>2</sub>/л и HNO<sub>3</sub> до pH 6.80, P1 – плазменная вода, pH 3.50, P2 – плазменная вода, нейтрализованная

Ca(OH)<sub>2</sub> до pH 6.80, P3 – плазменная вода, нейтрализованная Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> до pH = 6.74 (табл. 1). Показано, что основным фактором, повлиявшим на рост корней лука, была величина pH воды. В растворах с низким pH рост корней был замедлен. Явного стимулирования роста корней нейтрализованной плазменной водой обнаружено не было (хотя и ингибирующего ее действия тоже не выявлено).

Влияние обработки плазмой на проращивание семян изучали на горохе. Семена проращивали в воде в течение 5 сут в 4-х вариантах: 1 – семена инкубировали в водопроводной воде (контроль), 2 – семена инкубировали в свежей плазменной воде, обработанной 3 мин, 3 – семена инкубировали в растворе 5 мг HNO<sub>3</sub>/л, приготовленном на водопроводной воде, 4 – семена предварительно обрабатывали в разрядной камере (3 мин) и затем инкубировали в свежей плазменной воде, обработанной 3 мин.

Для семян гороха начало прорастания было отмечено на 3-и сут после начала опыта (табл. 2). Сравнение вариантов 1–3 показало, что плазменная вода наиболее эффективно действовала на горох, что выражалось в более раннем начале прорастания семян, большей длине корней (как средней, так и суммарной). Это можно объяснить действием содержащихся в плазменной воде питательных веществ, главным образом нитратов. Стимулирующий эффект от инкубации в растворе азотной кислоты был больше, чем в водопроводной воде, но меньше, чем в плазменной воде. Вероятно, это различие связано с действием других веществ, содержащихся в плазменной воде. Отсутствие ингибирующего эффекта при низком pH воды, возможно, связано с тем, что при инкубировании семян полной замены воды не проводили, так что некоторому увеличению pH могли способствовать вещества, выделяемые корнями, и также углекислый газ из воздуха.

Наиболее эффективное действие на семена оказал вариант обработки 4: на 1 сут ускорялось прорастание семян гороха, на 4-е и 5-е сут средняя длина корней была в 2–3 раза больше, чем в контроле. Вероятно, это было связано с повышением проницаемости покровов семян в результате их предварительной обработки в разрядной камере, благодаря чему облегчалось поглощение воды и ускорялся рост проростков [3]. По данным 4-суточной инкубации рассчитали энергию прорастания семян гороха. Она составила 8% для варианта 1, 75 – для варианта 2, 46 – для варианта 3 и 79% – для варианта 4. Этот показатель в контроле (вариант 1) был гораздо меньше, чем для раз-

**Таблица 3.** Средняя длина стебля при выращивании гороха в грунте, см

Вариант	Продолжительность проращивания, сут		
	4-е	7-е	11-е
1	2.5	4.3	5.9
2	3.1	6.1	7.7

ных сортов гороха (22–100%) [18]. Вероятно, это было вызвано допущенными отступлениями от процедуры проращивания, описанной в ГОСТ 12038-84 (недостаточное увлажнение, изменения температуры, отсутствие предварительного охлаждения семян), что замедлило их развитие в целом. На 5-е сут доля проросших семян гороха была больше и составила в варианте 1 – 84, в варианте 2 – 100, в варианте 3 – 88 и в варианте 4 – 100%.

Семена гороха после проращивания в вариантах 1 и 2 высадили в грунт и продолжали поливать соответствующей водой в течение 11 сут. Результаты измерения длины стебля приведены в табл. 3. Показано небольшое стимулирующее действие плазменной воды на рост стебля гороха.

Действие плазменной воды также проверили на грибах. Споры вешенки перемешали с грунтом. Одну серию поливали водопроводной, другую – плазменной водой. После 3 мес. выращивания плодовые тела были срезаны и взвешены. Средняя масса плодовых тел из набора, который поливали водопроводной водой, составила 87 г, плазменной водой – 201 г, т.е. примерно в 2 раза больше.

Поскольку использование для полива воды, обогащенной нитратами, может привести к их накоплению в продуктах питания, определили содержание нитратов в водном экстракте грибов. Содержание нитратов составило (в мг/кг сырого веса): в грибах, с поливом водопроводной водой – 21, в грибах с поливом плазменной водой – 12 мг/кг. Согласно санитарным нормам для продуктов питания [19], в грибах содержание нитратов не нормируется, в овощах норматив составляет от 60 до 500 мг/кг (в зависимости от вида овощей). Таким образом, норматив содержания нитратов в продуктах питания в опытных грибах не был превышен.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы химические и биологические свойства водопроводной воды, обработанной плазмой в опытной установке, созданной в ФТИ им А.Ф. Иоффе РАН. Плазма формируется в во-

де, насыщенной пузырьками воздуха, под действием высоковольтного импульса от генератора. Напряжение между электродами в разрядной камере составило до 33 кВ, частота импульсов – 500 Гц, время нарастания напряжения на разрядном промежутке – до 8 мкс, амплитуда тока после пробоя разрядного промежутка – до 400 А, фронт импульса тока после пробоя – около 150 нс. После пробоя через разрядный промежуток протекает униполярный пульсирующий ток, который полностью затухает через ~10 мкс. Длительность плазменной обработки воды составила 2.5–3 мин.

Под действием плазмы в воде происходило увеличение содержания нитратов и нитритов (от 0.5 до 7.5 мг N/л), электропроводности (от 110 до 320 мкСм/см), снижение pH (с 6.8 до 3.5). Окислительно-восстановительный потенциал плазменной воды достигал 610–590 мВ сразу после обработки, в течение 1 ч он снижался до 400 мВ. Йодометрический анализ показал наличие в воде окислителей с потенциалом >536 мВ сразу после обработки в концентрации 2.5–3.0 мМ-экв/л. Количество этих окислителей уменьшалось до нуля в течение 4 ч.

В опытах на растениях было показано отсутствие ингибирующего влияния нейтрализованной плазменной воды на корни лука-севка в *Allium*-тесте.

Плазменная вода оказывала стимулирующее действие на развитие семян гороха: семена прорастали на более раннем сроке, проростки имели большую длину корней (в 2 раза по сравнению с водопроводной водой на 5-е сут проращивания семян). После высаживания проросших семян в грунт в течение 11 сут длина стебля была на 20–40% больше у растений, которые поливали плазменной водой по сравнению с поливом водопроводной водой. Обработка семян в разрядной камере перед проращиванием стимулировала прорастание семян гороха.

Полив плазменной водой также стимулировал развитие грибов вешенок. При выращивании вешенок в грунте с поливом плазменной водой масса плодовых тел была в 2 раза больше, чем при поливе водопроводной водой, при этом концентрация нитратов в грибах не превышала норматив для продуктов питания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гордеев Ю.А. Методологические и агробиологические основы предпосевной биоактивации семян сельскохозяйственных культур потоком низко-температурной плазмы: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Смоленск, 2012. 46 с.

2. *Selcuk M., Oksuz L., Basaran P.* Decontamination of grains and legumes infected with *Aspergillus* spp. and *Penicillium* spp. by cold plasma treatment // *Biore-source Technol.* 2008. V. 99. P. 5104–5109.
3. *Bormashenko E., Grynyov R., Bormashenko Y., Drori E.* Cold radiofrequency plasma treatment modifies wettability and germination speed of plant seeds // *Sci. Rep.* 2012. V. 2. P. 741.
4. *Галиуллин Р.Р., Шарифуллин Ф.С., Нагмутдинова А.И., Вознесенский Э.Ф.* Исследование влияния ВЧЕ-плазменной обработки на посевные свойства семян сельскохозяйственных культур // *Вестн. технол. ун-та.* 2016. Т. 19. № 22. С. 154–156.
5. *Zhou Z., Huang Y., Yang S., Chen W.* Introduction of a new atmospheric pressure plasma device and application on tomato seeds // *Sci. Res.* 2011. V. 2. № 1. P. 23–27.
6. *Бобкова Е.С., Гриневиц В.И., Исакина А.А., Рыбкин В.В.* Разложение органических соединений в водных растворах под действием электрических разрядов атмосферного давления // *Изв. высш. учеб. завед. Сер. химия и хим. технол.* 2011. Т. 54. № 6. С. 3–17.
7. *Иванова И.П., Трофимова С.В., Карпел Вел Лейтнер Н., Аристова Н.А., Архипова Е.В., Буркина О.Е., Сысоева В.А., Пискаров И.М.* Анализ активных продуктов излучения плазмы искрового разряда, определяющих биологические процессы в клетках // *Совр. технол. в медицине.* 2012. № 2. С. 20–60.
8. *Judée, F., Simon S., Bailly C., Dufour T.* Plasma-activation of tap water using DBD for agronomy applications: Identification and quantification of long lifetime chemical species and production/consumption mechanisms // *Water Res.* 2018. V. 133. P. 47–59.
9. *Thagard S.M., Locke B.R.* Electrical discharge plasma for water treatment // *Advanced oxidation processes for water treatment. fundamentals and applications* / Ed. Stefan M. IWA Publishing, 2018. P. 493–534.
10. *Коротков С.В., Аристов Ю.В., Козлов А.К., Коротков Д.А., Рольник И.А.* Генератор электрических разрядов в воде // *Приборы и техника эксперимента.* 2011. № 2. С. 47–50.
11. *Fiskesjö G.* The *Allium* test in wastewater monitoring // *Environ. Toxicol. Water Qual.* 1993. V. 8. № 3. P. 291–298.
12. *Исидоров В.А.* Экологическая химия. СПб.: Химиздат, 2001. 304 с.
13. *ГУП “Водоканал Санкт-Петербурга”.* Технологии очистки. URL: [http://www.vodokanal.spb.ru/vodosnabzhenie/tehnologii\\_ochistki](http://www.vodokanal.spb.ru/vodosnabzhenie/tehnologii_ochistki) (по состоянию сайта на ноябрь 2019 г.).
14. *Søndergaard M.* Redox potential // *Encyclopedia of Inland Waters* / Ed. Gene E. Likens, 2009. P. 852–859.
15. *Sua X., Tian Y., Zhou H., Li Y., Zhang Z., Jiang B., Yang B., Zhang J., Fang J.* Inactivation efficacy of non-thermal plasma activated solutions against Newcastle disease virus // *Appl. Environ. Microbiol.* 2018. V. 84(9). P. e02836-17.
16. *Miyahara T., Oizumi M., Nakatani T., Sato T.* Effect of voltage polarity on oxidation-reduction potential by plasma in water // *AIP Advan.* 2014. V. 4. P. 047115.
17. *Барон Н.М., Пономарева А.М., Равдель А.А., Тимофеева З.Н.* Краткий справочник физико-химических величин. СПб.: Иван Федоров, 2002. 240 с.
18. *Каменев В.А., Казакова О.А., Торопова Е.Ю.* Повышение качества семян гороха на основании фитоэкспертизы в лесостепи Западной Сибири // *Актуальные проблемы агропромышленного комплекса.* Новосибирск, 2016. С. 31–36.
19. СанПиН 2.3.2.1078-01 Гигиенические требования безопасности пищевой ценности пищевых продуктов (с изменениями и дополнениями).

## Effect of Plasma-Treated Water on Plant Development

M. Yu. Andrianova<sup>a,#</sup>, S. V. Korotkov<sup>b</sup>, D. A. Korotkov<sup>b</sup>, and G. L. Spichkin<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Peter Great Saint Petersburg Polytechnic University  
ul. Politechnicheskaya 29, Saint Petersburg 195251, Russia

<sup>b</sup> A.F. Ioffe Physical and Technical Institute RAS  
ul. Politechnicheskaya 26, Saint Petersburg 194021, Russia

<sup>c</sup> LLK RPA “Phytotechnology”  
ul. Gzhatskaya 27, lit. A, Saint Petersburg 195220, Russia

<sup>#</sup>E-mail: andrianova\_myu@spbstu.ru

The results of investigation of properties of water treated with low-temperature electric discharge plasma are presented. An experimental setup is described that allows to initiate discharges in water at a frequency of up to 500 Hz by voltage pulses with an amplitude of ~30 kV and a front of ~8 MS and to form microsecond discharge current pulses with an amplitude of ~400 A and a front of ~150 NS. It is shown that at relatively small time plasma treatment (2–3 min) water volume ~0.7 l formed nitric and nitrous acid with a concentration of 7.5 mg N/l, reducing the pH to 3.5 units, and short-lived oxidants with the concentration of 2.5–3.0 mM-equiv/l, which increases the redox potential of the water to +610 mV. It was found that incubation in plasma water stimulated the germination of pea seeds in comparison with tap water. Watering the ground with plasma water increased the yield of the mass of fruit bodies of oyster mushrooms (*Pleurotus ostreatus*). The stimulating effect of plasma water on the growth of onion roots was not found.

**Key words:** plasma-treated water, plant development, test cultures, peas, onion, oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*).

УДК 631.41:631.582

## ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ПЛОДОРОДИЯ ПОЧВЫ ПОД ПОСЕВАМИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ<sup>1</sup>

© 2020 г. И. М. Михайленко<sup>1,\*</sup>, В. Н. Тимошин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Агрофизический научно-исследовательский институт  
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия

\*E-mail: [Iya.mihailenko@yandex.ru](mailto:Iya.mihailenko@yandex.ru)

Поступила в редакцию 24.12.2019 г.

После доработки 20.01.2020 г.

Принята к публикации 11.05.2020 г.

Предложена новая теория и алгоритм управления параметрами плодородия почвы под посевом яровой пшеницы. Они основаны на классической теории управления динамическими системами и методике декомпозиции сложной задачи управления на ряд более простых задач. Предложенную задачу решают в 2 этапа, когда на первом этапе синтезируют оптимальные программы изменения параметров почвы, а на втором этапе находят оптимальную последовательность технологических операций, включающих в себя внесение минеральных удобрений и поливы, выполняемые в периоды заданных фаз развития посева яровой пшеницы. Разработанный на основе предлагаемой теории программно-технический комплекс представляет собой существенный вклад в цифровизацию отрасли растениеводства.

*Ключевые слова:* математические модели, параметры состояния, посев яровой пшеницы, алгоритмы управления.

DOI: 10.31857/S0002188120080062

### ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] представлена концепция управления агротехнологиями в системах точного земледелия (ТЗ), которая определяет 4 уровня управления связанных между собой задач. Верхний уровень является стратегическим и реализуется в годовом масштабе времени, охватывая севообороты. Второй уровень, реализуемый в одном интервале вегетации в суточном масштабе времени, является программным и разрешает компромисс между конечным результатом и затрачиваемым на его получение ресурсом. Два нижних уровня управления, реализуемые в реальном времени, отработывают оптимальные решения, полученные на верхних уровнях с учетом меняющихся условий вегетации и технических особенностей исполнительных технологических машин и устройств.

В работах [2, 3] была рассмотрена задача управления параметрами химического состояния почвы на стратегическом уровне, в которой синтезировались оптимальные стратегии внесения минеральных удобрений и мелиорантов во все го-

ды используемого севооборота. В настоящей работе рассмотрен программный уровень, где управление заключается в выборе оптимальной последовательности технологических операций, определении их размера в заданное время выполнения в течение одного вегетационного периода. Такими операциями является внесение минеральных удобрений и поливы, обеспечивающие доступность элементов питания растениями в посевах возделываемой культуры. В работах [2, 3] эту задачу решали на модельной культуре, в качестве которой были исследованы многолетние травы, идущие на приготовление грубых волокнистых кормов для молочного скота. Цель работы – дальнейшее развитие теоретической базы программного управления параметрами почв под культурами, претерпевающими в период вегетации несколько фенологических фаз развития. Таковой культурой в этом случае служила яровая пшеница.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Фундаментальной основой для решения задач программного управления являются математические модели, описывающие динамику парамет-

<sup>1</sup> Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-016-00008).

ров состояния объекта управления (**ОУ**), в нашем случае – это сельскохозяйственное поле под посевом яровой пшеницы. При этом рассматриваемый **ОУ** характеризуется как континуальными параметрами состояния, к которым могут быть отнесены параметры состояния биомассы самого посева и почвенной среды, так и структурными состояниями, к которым могут быть отнесены фенофазы. Несмотря на то, что наступление фенофаз зависит от многих условий, при решении задачи программного управления удобно воспользоваться временными шкалами. Существует несколько таких шкал для определения времени наступления фенофаз злаковых культур: Фикеша (1954), Келлера и Баггиолини (1954), Задокса, Чанга и Конзака (1974) и др. В настоящей работе использовали шкалу Задокса, которая для яровой пшеницы имеет следующий вид в суточном времени  $t$ :

- если  $\sum t \in (0 - 7)$ , то  $s = 1$  фаза **посев**;
- если  $\sum t \in (11-13)$ ,  
то  $s = 2$  фаза **всходы (1, 2, 3 листа)**;
- если  $\sum t \in (21, 29)$ , то  $s = 3$  фаза **кущение**;
- если  $\sum t \in (30)$ ,  
то  $s = 4$  фаза **выход в трубку**;
- если  $\sum t \in (31-32)$ ,  
то  $s = 5$  фаза **1-е, 2-е междоузлие**;
- если  $\sum t \in (37)$ ,  
то  $s = 6$  фаза **флаговый лист**;
- если  $\sum t \in (39)$ , то  $s = 7$  фаза **язычок**;
- если  $\sum \tau \in (49)$ ,  
то  $s = 8$  фаза **открытие листовой пазухи**;
- если  $\sum t \in (51-59)$ ,  
то  $s = 9$  фаза **колошение**;
- если  $\sum t \in (61-69)$ ,  
то  $s = 10$  фаза **цветение**;
- если  $\sum t \in (71-75)$ ,  
то  $s = 11$  фаза **молочная спелость**;
- если  $\sum t \in (85-86)$ ,  
то  $s = 12$  фаза **восковая спелость**;
- если  $\sum t \geq 86$ ,  
то  $s = 13$  фаза **полная спелость**.

Весь период вегетации в зависимости от структуры биомассы посева может быть разделен на 2 интервала времени: со 2-й по 9-ю и с 9-й по 13-ю фенофазы.

Для первого интервала времени для фенофаз со 2-й по 9-ю модель динамики параметров структуры биомассы посева имеет следующий вид [4]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1m} \\ \dot{x}_{2m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} x(t)_{1m} \\ x(t)_{2m} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} v_N(t) \\ v_K(t) \\ v_P(t) \\ v_{Mg}(t) \\ v_5(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$t \in (T_1, T_8)$ ,

где приняты следующие обозначения:  $x_{1m}$  – средняя для площади поля плотность общей биомассы посева, включающая сухое вещество и сырую массу (влагу), ц/га;  $x_{2m}$  – средняя для площади поля плотность сырой массы посева, ц/га; внешними возмущениями в обоих блоках являются  $f_1$  – среднесуточная температура воздушной среды, °C;  $f_2$  – среднесуточный уровень радиации, Вт/(м² ч);  $f_3$  – среднесуточная интенсивность осадков, мм; параметры химического состояния почвы:  $v_N$  – содержание азота в почве,  $v_K$  – содержание калия в почве,  $v_P$  – содержание фосфора в почве;  $v_{Mg}$  – содержание магния в почве;  $v_5$  – влагозапас в почве, мм.

Модель (1) для удобства дальнейшего применения удобно представить в канонической символьной векторно-матричной форме, где все переменные объединены в векторы, а параметр – в соответствующие матрицы

$$\dot{X}_m = A_m X_m(t) + B_m V(t) + C_m F(t). \quad (2)$$

Для 2-го интервала времени для фенофаз с 9-й по 13-ю модель динамики параметров структуры биомассы посева имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1u} \\ \dot{x}_{2u} \\ \dot{x}_{3u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}_u \begin{bmatrix} x(t)_{1u} \\ x(t)_{2u} \\ x(t)_{3u} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{aligned}
& + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_N(t) \\ v_K(t) \\ v_P(t) \\ v_{Mg}(t) \\ v_5(t) \end{bmatrix} + \\
& + \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix}, \\
& t \in (T_9, T_{13}).
\end{aligned} \quad (3)$$

В этом блоке структуры биомассы параметрами состояния являются:  $x_{1u}$  – средняя для площади поля плотность общей биомассы посева, включающей в себя массу колосьев и стеблей, ц/га;  $x_{2u}$  – средняя для площади поля плотность сырой массы посева, ц/га;  $x_{3u}$  – средняя для площади поля плотность массы колосьев, включающей в себя массу стержня колоса, зерна, остьев, колосовых чешуек, ц/га; внешними возмущениями в обоих блоках являются:  $f_1$  – среднесуточная температура воздушной среды, °С;  $f_2$  – среднесуточный уровень радиации, Вт/(м<sup>2</sup> ч);  $f_3$  – среднесуточная интенсивность осадков, мм; параметры химического состояния почвы:  $v_N$  – содержание азота в почве,  $v_K$  – содержание калия в почве,  $v_P$  – содержание фосфора в почве;  $v_{Mg}$  – содержание магния в почве;  $v_5$  – влагозапас в почве, мм.

Каноническая символьная векторно-матричная форма модели (3) имеет вид:

$$\dot{X}_u = A_u X_u(t) + B_u V(t) + C_u F(t). \quad (4)$$

Модель динамики параметров состояния почвы для фенофаз со 2-й по 9-ю имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} \dot{v}_N \\ \dot{v}_K \\ \dot{v}_P \\ \dot{v}_{Mg} \\ \dot{v}_5 \end{bmatrix}_{2,9} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & a_{15} \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & a_{25} \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & a_{35} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & a_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} \end{bmatrix}_{2,9} \begin{bmatrix} v_N \\ v_K \\ v_P \\ v_{Mg} \\ v_5 \end{bmatrix} + \\
& + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{2,9} \begin{bmatrix} d_N(t) \\ d_K(t) \\ d_P(t) \\ d_{Mg}(t) \\ d_W(t) \end{bmatrix} + \\
& + \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} \\ 0 & 0 & c_{23} \\ 0 & 0 & c_{33} \\ 0 & 0 & c_{43} \\ c_{51} & c_{52} & 1 \end{bmatrix}_{2,9} \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix} + \\
& - \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & m_{13} \\ m_{21} & 0 & m_{23} \\ m_{31} & 0 & m_{33} \\ m_{41} & 0 & m_{43} \\ m_{51} & m_{52} & 0 \end{bmatrix}_{2,9} \begin{bmatrix} x_{1u}(t) \\ x_{2u}(t) \\ x_{3u}(t) \end{bmatrix},
\end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
& + \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} \\ 0 & 0 & c_{23} \\ 0 & 0 & c_{33} \\ 0 & 0 & c_{43} \\ c_{51} & c_{52} & 1 \end{bmatrix}_{29} \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_{11} & 0 \\ m_{21} & 0 \\ m_{31} & 0 \\ m_{41} & 0 \\ m_{51} & m_{52} \end{bmatrix}_{29} \begin{bmatrix} x_{1m}(t) \\ x_{2m}(t) \end{bmatrix},
\end{aligned}$$

или в компактной символьной форме

$$\dot{V}_{29} = A_{29} V(t) + B_{29} D(T_3, T_9) + C_{29} F(t) - M_{29} X_m(t). \quad (6)$$

Модель параметров химического состояния почвы для фенофаз со 9-й по 13-ю:

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} \dot{v}_N \\ \dot{v}_K \\ \dot{v}_P \\ \dot{v}_{Mg} \\ \dot{v}_5 \end{bmatrix}_{9,13} = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & a_{15} \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & a_{25} \\ 0 & 0 & a_{33} & 0 & a_{35} \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & a_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} \end{bmatrix}_{9,13} \begin{bmatrix} v_N \\ v_K \\ v_P \\ v_{Mg} \\ v_5 \end{bmatrix} + \\
& + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{9,13} \begin{bmatrix} d_N(t) \\ d_K(t) \\ d_P(t) \\ d_{Mg}(t) \\ d_W(t) \end{bmatrix} + \\
& + \begin{bmatrix} 0 & 0 & c_{13} \\ 0 & 0 & c_{23} \\ 0 & 0 & c_{33} \\ 0 & 0 & c_{43} \\ c_{51} & c_{52} & 1 \end{bmatrix}_{9,13} \begin{bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ f_3(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & m_{13} \\ m_{21} & 0 & m_{23} \\ m_{31} & 0 & m_{33} \\ m_{41} & 0 & m_{43} \\ m_{51} & m_{52} & 0 \end{bmatrix}_{9,13} \begin{bmatrix} x_{1u}(t) \\ x_{2u}(t) \\ x_{3u}(t) \end{bmatrix},
\end{aligned} \quad (7)$$

где  $d_P(t)$ ,  $d_K(t)$ ,  $d_N(t)$ ,  $d_W(t)$  – дозы внесения элементов питания, соответственно фосфора – Р, калия – К, мелиоранта – Са, азота – N, магния – Mg, кг/га и норма полива, мм;  $a_{11}$ – $a_{33}$ ,  $b_2$ – $b_3$ ,  $c_1$ – $c_3$  – параметры модели, оцениваемые по экспериментальным данным;  $t$  – суточное время.

В моделях (5), (7) введены параметры  $m_{ij}$  – связи показателей химического состояния почвы и состояния биомассы посева, которые учитывают вынос элементов питания и влаги из почвы. В моделях (6), (8) эти параметры объединены в матрицы  $M_{29}$ ,  $M_{9,13}$ .

Модель (7) в компактной символьной векторно-матричной форме имеет вид:

$$\dot{V}_{9,13} = A_{9,13} V(t) + B_{9,13} D(t) + C_{9,13} F(t) - M_{9,13} X_u(t). \quad (8)$$

В соответствии с разработанной концепцией управления агротехнологиями рассматриваемая задача решается в 2 этапа [1]. На первом этапе в

качестве управляющих переменных применяют параметры состояния почвы, и находят программу их изменения во всем временном интервале вегетации, обеспечивающую достижение поставленной цели управления. На 2-м этапе находят последовательность технологических операций, обеспечивающих минимальное отклонение параметров почвы от оптимальной программы, полученной на первом этапе. Такая декомпозиция задачи программного управления существенно упрощает синтез оптимальных программ управления, учитывая тот факт, что почва, как среда, через которую реализуется управление, представляет собой самостоятельную сложную многомерную динамическую систему. Кроме того, результаты оптимизации на первом этапе представляют самостоятельный интерес, т.к. позволяют оценить потенциальный уровень урожайности культуры.

В соответствии с методикой динамического программирования [6], задача первого этапа решается от конца вегетационного периода к его началу. Поэтому и целью управления в этой задаче является получение заданной урожайности культуры в конце интервала вегетации, при выполнении условия получения заданной структуры всего биологического урожая, а именно, требуемого соотношения между массой стеблей (соломы) и колоса (зерна и мякины), а также достижение требуемой влажности зерна.

В обозначенных параметрах состояния формально цель управления выглядит следующим образом:

$$x_{1u}(T_{13}) \geq 2.1U^*, \quad x_{2u}(T_{13}) \leq 0.15U^*, \\ x_{3u}(T_{13}) \geq U^*,$$

где:  $U^*$  – заданная урожайность зерна, ц/га.

Критерий оптимальности для межвегетационного периода с 9-й по 13-ю фенофазу, отвечающий поставленной цели, имеет следующий вид:

$$J_u(T_{13}) = [X_u(T_{13}) - X_u^*]^T G_u [X_u(T_{13}) - X_u^*], \quad (9)$$

где  $X_u^T = [1.1U \ 0.15U \ U]$  – вектор, компонентами которого являются: общая биомасса, сырая

масса, масса зерна (урожай);  $G_u = \begin{bmatrix} g_{11} & 0 & 0 \\ 0 & g_{22} & 0 \\ 0 & 0 & g_{33} \end{bmatrix}_u$  –

весовая матрица массовых и качественных составляющих критерия.

Критерий (9) представляет собой взвешенную сумму квадратов отклонения прогнозных величин в конце периода вегетации вектора  $X_u(T_{13})$  от

заданной величины  $X_u^*$ . Формируемая программа управления должна обеспечивать минимум этого критерия.

Результатом решения задачи управления является программа оптимального изменения параметров состояния почвы, а также начальные условия параметров состояния посева перед началом фазы колошения, которые являются терминальными показателями для параметров состояния предшествующей фенологической фазы.

В соответствии со схемой принципа максимума [6], гамильтониан для системы (4) и критерия оптимальности (9) имеет вид:

$$H_u = \Psi_u^T (A_u X_u(t) + B_u V(t) + C_u F(t)), \quad (10)$$

где  $\Psi_u$  – вектор сопряженных переменных, являющийся решением следующей динамической системы:

$$\dot{\Psi}_u = -\frac{\partial H_u}{\partial X_u} = -A_u^T \Psi_u, \\ t \in (T_{15}, T_9), \quad \Psi_u(T_{15}) = \frac{\partial J_u(T_{15})}{\partial X_u}. \quad (11)$$

С учетом введенных обозначений пошаговый алгоритм решения задачи представляет собой следующую последовательность операций.

*Шаг 0.* Устанавливают календарное время начала  $T_9$  и конца  $T_{13}$  межфазового периода формирования урожая, чем задают интервал времени решения задачи. Задают начальные условия: вектор параметров состояния посева  $X_u(T_9)$  и начальную программу управления  $V(t) = V_0$ . Принимают средние многолетние величины вектора климатических возмущений  $F(T_9, T_{15})$ . Задают минимальную величину критерия оптимальности (9), при котором алгоритм останавливается. Принимают циклическую переменную алгоритма  $i = 0$ .

*Шаг 1.* Решают систему  $\dot{X}_{ui} = A_u X_{ui}(t) + B_u V_i(t) + C_u F(t)$  в прямом времени в интервале  $t \in (T_9, T_{15})$ , в результате чего получают векторный массив  $X_{ui}(t)$ .

*Шаг 2.* Решают систему

$$\dot{\Psi}_{ui} = -\frac{\partial H_u}{\partial X_{ui}} = -A_u^T \Psi_{ui}, \quad t \in (T_{15}, T_9), \\ \Psi_{ui}(T_{15}) = \frac{\partial J_u(T_{15})}{\partial X_u} = 2G[X_{ui}(T_{15}) - X_u^*].$$

в обратном времени в интервале  $t \in (T_{15}, T_9)$ , в результате чего получают векторный массив  $\Psi_{ui}(-t)$ , который разворачивается во времени  $\Psi_{ui}(t)$ .

*Шаг 3.* Находят очередное приближение программы управления вектором параметров химического состояния почвы:

$$V_{i+1}^*(t) = V_i^*(t) - \Delta_i GR_i(t),$$

$$GR_i(t) = \frac{\partial H}{\partial V_i}(t) = B_u \Psi_{ui}(t).$$

*Шаг 4.* Находят очередное приближение начальных условий на границе фенофаз

$$X_{ui+1}^*(T_9) = X_{ui}^*(T_9) - \Delta_i \Psi_{ui}(T_9).$$

*Шаг 5.* Принимают циклическую переменную  $i = i + 1$ , осуществляют переход к шагу 1, вплоть до выполнения условия

$$J_i(T_{15}) \leq \delta.$$

Теперь подобную задачу решают и в интервале, предшествующем фазе колошения.

*Шаг 6.* Принимают конечные условия для межвегетационного периода  $t \in (T_1, T_9)$   $X_m(T_9) = H X_{ui+1}^*(T_9)$ , где  $H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$  – матрица связи.

*Шаг 7.* Принимают критерий оптимальности для межвегетационного периода с первой по 9-ю фенофазы:

$$J(T_9) = [X_m(T_9) - H X_u^*(T_9)]^T G_m [X_m(T_9) - H X_u^*(T_9)],$$

$$G_m = \begin{bmatrix} g_{11} & 0 \\ 0 & g_{22} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Критерий (12) имеет такой же смысл и форму, как и критерий (9), с той лишь разницей, что его определяют для 9-й фенофазы.

*Шаг 8.* Устанавливают календарное время начала  $T_1$  и конца  $T_9$  межфазового периода формирования урожая. Задают начальные условия: вектор параметров состояния посева  $X_m(T_1)$  и начальную программу управления  $V(t) = V_0$ . Принимают средние многолетние величины вектора климатических возмущений  $F(T_1, T_9)$ . Принимают циклическую переменную  $i=0$ .

*Шаг 9.* Решают систему  $\dot{X}_{mi} = A_m X_{mi}(t) + B_m V_i(t) + C_m F(t)$  в прямом времени в интервале  $t \in (T_1, T_9)$ , в результате чего получают векторный массив  $X_{mi}(t)$ .

*Шаг 10.* Решают систему

$$\dot{\Psi}_{mi} = -\frac{\partial H_m}{\partial X_{mi}} = -A_m^T \Psi_{mi}, \quad t \in (T_9, T_1),$$

$$\Psi_{mi}(T_9) = \frac{\partial J_m(T_{13})}{\partial X_{mi}} = 2G[X_{mi}(T_9) - H X_u^*(T_9)]$$

в обратном времени в интервале  $t \in (T_9, T_1)$ , в результате чего получают векторный массив  $\Psi_{mi}(-t)$ , который разворачивается во времени  $\Psi_{mi}(t)$ .

*Шаг 11.* Находят очередное приближение программы управления вектором параметров химического состояния почвы:

$$V_{i+1}^*(t) = V_i^*(t) - \Delta_i GR_i(t),$$

$$GR_i(t) = \frac{\partial H}{\partial V_i}(t) = B_m \Psi_{mi}(t).$$

*Шаг 12.* Принимают циклическую переменную  $i = i + 1$ , осуществляют переход к шагу 1, вплоть до выполнения условия

$$J_{mi}(T_9) \leq \delta.$$

В результате решения задачи первого этапа формируется оптимальная программа изменения параметров состояния почвы  $V^*(t)$  во всем интервале вегетации, а также программа потенциального развития посева  $X^*(t)$ , которая получается при подстановке оптимальной программы изменения параметров состояния почвы в модели параметров состояния посевов (2), (4).

Достижимой целью управления на 2-м этапе общего решения задачи является: “обеспечение наиболее близкого приближения к оптимальной программе изменения содержания элементов питания и влагосодержания в почве, полученной на первом этапе за счет независимого выбора размеров подкормок и поливов”. При этом внесение удобрений и поливы проводят в фиксированные моменты времени наступления следующих фенологических фаз:  $s = 3$  (кущение),  $s = 9$  (колошение),  $s = 10$  (цветение),  $s = 11$  (молочная спелость).

В свою очередь задача управления на этом этапе решается в 2-х интервалах времени: с 1-й по 9-ю и с 9-й по 13-ю фенофазу. Она заключается в нахождении последовательности векторов доз внесения удобрений и поливов, доставляющих минимум следующим критериям:

$$J_{1,9} = \int_{T_1}^{T_9} [(V_{1,9}^*(t) - V_{1,9}(t))^T G (V_{1,9}^*(t) - V_{1,9}(t)) + C_D D(T_3, T_9)] dt, \quad (13)$$

$$J_{9,13} = \int_{T_9}^{T_{13}} [(V_{9,13}^*(t) - V_{9,13}(t))^T G (V_{9,13}^*(t) - V_{9,13}(t)) + C_D D(T_{10}, T_{11})] dt, \quad (14)$$

где  $C_D$  – вектор стоимостей единиц управления.

Гамильтонианы систем моделей (6), (8) и критериев (13), (14) имеют следующий вид:

$$H_{1,9} = [(V_{1,9}^*(t) - V_{1,9}(t))^T G(V_{1,9}(t) - V_{1,9}(t)) + C_D D(T_3, T_9)] + \Psi_{1,9}^T [A_{1,9} V_{1,9}(t) + B_{1,9} D_i(T_3, T_9) + C_{1,9} F(t) - M_{1,9} X_m^*(t)], \quad (15)$$

$$H_{9,13} = [(V_{9,13}^*(t) - V_{9,13}(t))^T G(V_{9,13}^*(t) - V_{9,13}(t)) + C_D D(T_{10}, T_{11})] + \Psi_{9,13}^T [A_{9,13} V_{9,13}(t) + B_{9,13} D_i(T_{10}, T_{11}) + C_{9,13} F(t) - M_{9,13} X_u^*(t)]. \quad (16)$$

Алгоритм нахождения этих последовательностей имеет следующий вид.

*Шаг 1.* Задают циклическую переменную  $i = 0$ , начальное приближение последовательностей  $D_{0,1,9i}^*(t) = \{D_{0i}(t_3), D_{0i}(t_9)\}$ ,  $D_{0,10,11i}^*(t) = \{D_{0i}(t_{10}), D_{0i}(t_{11})\}$ , средние многолетние величины климатических параметров  $F(t)$ , минимальную величину критериев оптимальности  $\delta$ , при которой алгоритм останавливается.

*Шаг 2.* Для программы потенциального развития посева  $X_m^*(t)$ , полученной на первом этапе, в прямом времени в интервале  $t \in (T_1, T_9)$ ,  $V_{1,9,i}(T_2) = V_{1,9,i,0}$  решают систему:

$$\dot{V}_{19,i} = A_{19} V_{19,i}(t) + B_{19} D(T_2, T_9)_i + C_{19} F(t) - M_{19} X_m^*(t),$$

в результате чего получают векторный массив  $V_{1,9,i}(t)$ .

Вычисляют критерий (13) и если  $J_{1,9,i} < \delta$ , то останавливаются, иначе происходит переход к шагу 5.

*Шаг 3.* Для программы потенциального развития посева  $X^*(t)$ , полученной на первом этапе, в прямом времени в интервале  $t \in (T_9, T_{13})$ ,  $V_{9,13,i}(T_2) = V_{9,13,i,0}$  решают систему:

$$\dot{V}_{9,13,i} = A_{9,13} V_{9,13,i}(t) + B_{9,13} D(t) + C_{9,13} F(t) - M_{9,13} X_u^*(t),$$

в результате чего получают векторный массив  $V_{9,13,i}(t)$ .

Вычисляют критерий (14) и если  $J_{9,13,i} < \delta$ , то останавливаются, иначе происходит переход к шагу 4.

*Шаг 4.* Решают системы для сопряженных переменных:

$$\dot{\Psi}_{1,9,i}(t) = -\frac{\partial H_{1,9,i}(t)}{\partial V_{1,9,i}} = -[2G(V_{1,9,i}^*(t) - V_{1,9,i}(t)) + A_{1,9}^T \Psi_{1,9,i}(t)],$$

в обратном времени в интервале  $t \in (T_9, T_1)$ ,  $\Psi_{1,9,i}(T_9) = 0$ , в результате чего получают векторный массив  $\Psi_{1,9,i}(-t)$ , который разворачивается во времени  $\Psi_{1,9,i}(t)$ ;

$$\dot{\Psi}_{9,13,i}(t) = -\frac{\partial H_{9,13,i}(t)}{\partial V_{9,13,i}} = -[2G(V_{9,13,i}^*(t) - V_{9,13,i}(t)) + A_{9,13}^T \Psi_{9,13,i}(t)],$$

в обратном времени в интервале  $t \in (T_{13}, T_9)$ ,  $\Psi_{9,13,i}(T_{13}) = 0$ , в результате чего получают векторный массив  $\Psi_{9,13,i}(-t)$ , который разворачивается во времени  $\Psi_{9,13,i}(t)$ .

*Шаг 5.* Находят очередные приближения векторов доз внесения удобрений и поливов  $D^*(t)_{i+1}$ :

$$D_{ni+1}(T_3, T_9) = D_{ni}(T_3, T_9) - \Delta_i^* \frac{\partial H_{1,9}(t)}{\partial D_{ni}(T_3, T_9)},$$

$$D_{ni+1}(T_3, T_9) = D_{ni}(T_3, T_9) - \Delta_i^* (C_D + B_{1,9}^T \Psi_{1,9}(T_3, T_9)), \quad \text{если } D_{ni}(T_3, T_9) \in \Omega_{3,9};$$

$$D_{ni+1}(T_3, T_9) = D_{ni}(T_3, T_9), \quad \text{если } D_{ni+1}(T_3, T_9) \notin \Omega_{T_3, T_9};$$

вычисляют критерий оптимальности  $J_{1,9}$ , если условие  $J_{1,9,i} \leq \delta$  не выполняется, то циклическую переменную принимают равной  $i = i + 1$  и осуществляют переход к шагу 2, вплоть до выполнения условия  $J_{1,9} \leq \delta$ ;

$$D_{ni+1}(T_9, T_{10}) = D_{ni}(T_9, T_{10}) - \Delta_i^* \frac{\partial H_{9,13}(t)}{\partial D_{ni}(T_9, T_{10})},$$

$$D_{ni+1}(T_9, T_{10}) = D_{ni}(T_9, T_{10}) - \Delta_i^* (C_D + B_{9,13}^T \Psi_{9,13}(T_9, T_{10})), \quad \text{если } D_{ni}(T_9, T_{10}) \in \Omega_{9,10};$$

$$D_{ni+1}(T_9, T_{10}) = D_{ni}(T_9, T_{10}),$$

$$\text{если } D_{ni+1}(T_9, T_{10}) \notin \Omega_{T_9, T_{10}};$$

вычисляют критерий оптимальности  $J_{9,13}$ , если условие  $J_{9,13} \leq \delta$  не выполняется, то циклическую переменную принимают равной  $i = i + 1$  и осуществляют переход к шагу 3, вплоть до выполнения условия  $J_{9,13,i} \leq \delta$ .

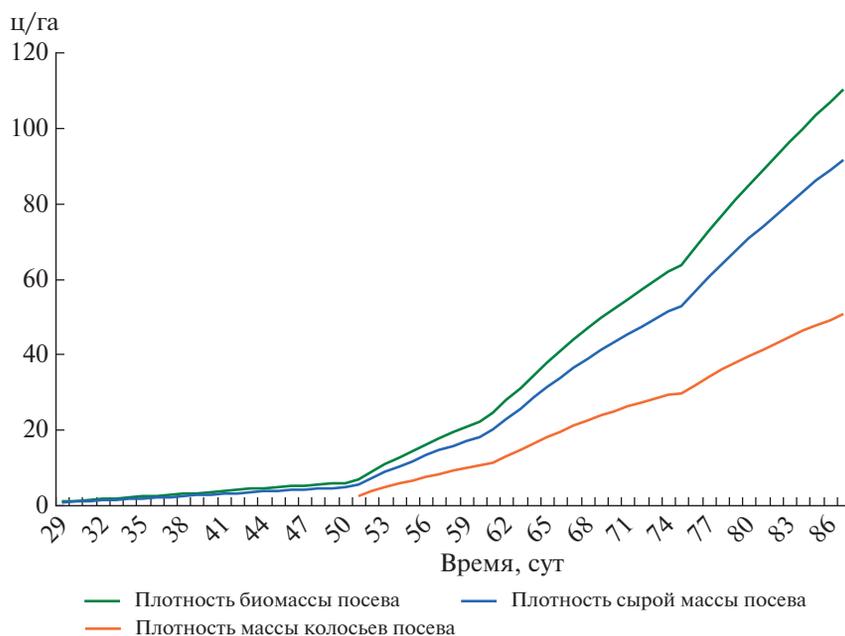


Рис. 1. Динамика состояния посева яровой пшеницы во всем интервале вегетации.

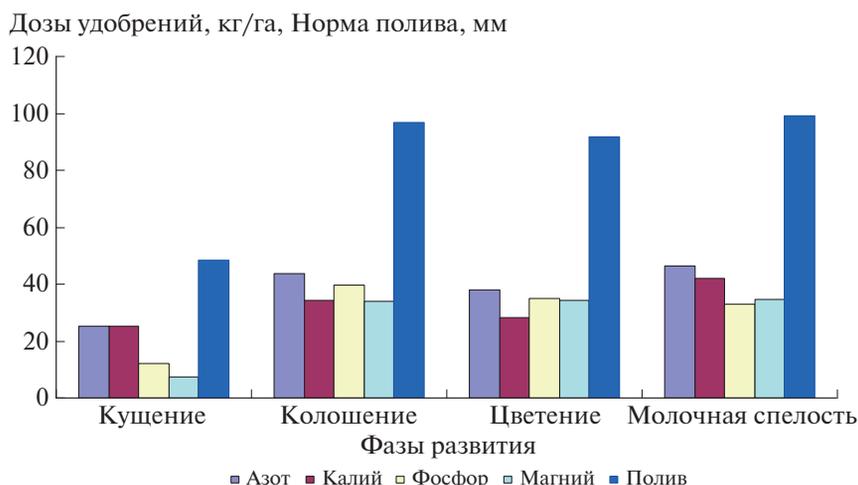


Рис. 2. Последовательность технологических операций в фазы вегетации яровой пшеницы.

## АПРОБАЦИЯ

Для апробации предложенной теории использовали экспериментальные данные опытного полигона Агрофизического НИИ за период 2012–2017 гг., по которым строили базовые математические модели. В отсутствии на этом полигоне систем орошения эти данные дополнили результатами, полученными путем генерации посредством базовых моделей, в которых учитывали поливы во всех фенофазах посева яровой пшеницы.

На графиках (рис. 1) представлена динамика посева яровой пшеницы во всем интервале вегетации при формировании оптимальной последовательности доз внесения удобрений и поливов для заданного урожая 50 ц/га во всех выбранных фенофазах (рис. 2). Эффективность управления оценивали величинами критерия оптимальности (12) в фенофазах:  $s = 3$  (кушение) –  $J_3 = 1.69$  (ц/га)<sup>2</sup>,  $s = 9$  (колошение) –  $J_9 = 1.33$  (ц/га)<sup>2</sup>,  $s = 10$  (цветение) –  $J_{10} = 1.3$  (ц/га)<sup>2</sup>,  $s = 11$  (молочная спелость) –  $J_{11} = 1.2$  (ц/га)<sup>2</sup>. Тенденция к уменьшению величины критерия отражала увеличение точности воспроизводства оптимальной программы изменения параметров почвы, полученной на первом

талии при формировании оптимальной последовательности доз внесения удобрений и поливов для заданного урожая 50 ц/га во всех выбранных фенофазах (рис. 2). Эффективность управления оценивали величинами критерия оптимальности (12) в фенофазах:  $s = 3$  (кушение) –  $J_3 = 1.69$  (ц/га)<sup>2</sup>,  $s = 9$  (колошение) –  $J_9 = 1.33$  (ц/га)<sup>2</sup>,  $s = 10$  (цветение) –  $J_{10} = 1.3$  (ц/га)<sup>2</sup>,  $s = 11$  (молочная спелость) –  $J_{11} = 1.2$  (ц/га)<sup>2</sup>. Тенденция к уменьшению величины критерия отражала увеличение точности воспроизводства оптимальной программы изменения параметров почвы, полученной на первом

этапе решения общей задачи управления. Полученные результаты соответствовали используемым экспериментальным данным и выбранной последовательности фенофаз. Для других данных и другой последовательности фенофаз результаты будут иными. Сравнение эффективности таких вариантов является предметом самостоятельного исследования. В задачу данной работы входил только анализ работоспособности предложенной теории и алгоритмов управления.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена новая теория и алгоритм программного управления состоянием посевов яровой пшеницы, апробированная по экспериментальным данным. Их основная особенность заключается в том, что общую задачу управления решают в 2 этапа, на первом из которых синтезируют оптимальную программу изменения параметров почвы, обеспечивающую достижение заданного результата, на втором этапе находят оптимальную последовательность технологических операций по внесению удобрений и поливов, выполняемую по заранее выбранным фенологическим фазам развития культуры. Указанная последовательность обеспечивает достижение заданной

урожайности культуры и структуры биомассы посева. Разработанный на основе предложенной теории программно-технический комплекс может стать эффективным цифровым инструментарием для современного агронома.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайленко И.М. Теоретические основы и техническая реализация управления агротехнологиями. СПб.: СПбГТУ, 2017. 250 с.
2. Михайленко И.М., Тимошин В.Н. Оптимизация управления химическими параметрами почв в полевых севооборотах // Агрехимия. 2016. № 3. С. 3–10.
3. Михайленко И.М., Тимошин В.Н. Управление химическим состоянием почв на основе данных дистанционного зондирования Земли // Таврич. вестн. аграр. науки. 2018. № 1 (13). С. 65–76.
4. Михайленко И.М., Тимошин В.Н. Математическое моделирование и управление состоянием посевов по данным дистанционного зондирования // Агрофизика. 2016. № 1. С. 32–42.
5. Михайленко И.М., Тимошин В.Н. Оптимальное управление орошением сельскохозяйственных культур // Мелиорация и водн. хоз-во. 2016. № 6. С. 21–24.
6. Казаков И.Е. Методы оптимизации стохастических систем. М.: Наука, 1987. 354 с.

## Software Management of Soil Fertility Parameters under Spring Wheat Crops

I. M. Mikhailenko<sup>a,#</sup> and V. N. Timoshin<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Agrophysical Research Institute, Grazhdansky prosp. 14, Saint-Petersburg 195220, Russia

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

A new theory and algorithm for controlling the parameters of soil fertility under spring wheat sowing is proposed. They are based on the classical theory of control of dynamic systems and the method of decomposition of a complex control problem into a number of simpler problems. The proposed task is solved in 2 stages, when the first stage synthesizes optimal programs for changing soil parameters, and at the second stage finds the optimal sequence of technological operations, including the introduction of mineral fertilizers and irrigation, performed during the specified phenophases of the development of spring wheat sowing. Developed on the basis of the proposed theory, the software and technical complex is a significant contribution to the digitalization of the crop industry.

*Key words:* mathematical model, options, condition, sowing of spring wheat, the control algorithms.

## ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. В журнале “Агрохимия” публикуются оригинальные теоретические, проблемные, экспериментальные и методические статьи, соответствующие профилю журнала, а также аналитические обзоры, рецензии и хроники. Работы, ранее опубликованные, редакция не принимает.

2. Объем экспериментальных статей не должен превышать 25 машинописных страниц (включая таблицы и список литературы), обзоров – 35 страниц. **Повторение одних и тех же данных в таблицах и рисунках не допускается.**

3. Статьи должны сопровождаться направлением на опубликование от того учреждения, в котором выполняли работу, и экспертным заключением, в котором говорится об отсутствии сведений, запрещенных к опубликованию. К статье необходимо приложить договор о передаче авторского права РАН (текст договора на имя главного редактора журнала размещен на сайте РАН [www.ras.ru](http://www.ras.ru)). **Статьи и сопроводительные документы должны быть представлены только в электронном виде и присланы в редакцию по электронной почте. Адрес электронной почты редакции: [j.agrochem@mail.ru](mailto:j.agrochem@mail.ru).** Текст, таблицы и рисунки следует размещать в одном файле.

4. Присылаемую в редакцию статью подписывают все авторы. При этом обязательно указывают фамилию, имя, отчество, почтовый адрес, контактный телефон, адрес электронной почты одного из авторов, с которым следует вести переписку.

5. Текст и таблицы должны быть напечатаны в формате Word, Times New Roman, 14 пунктов через 2 интервала. Таблицы, подрисуночные подписи и рисунки печатаются на отдельных листах. Все страницы должны быть пронумерованы.

6. Начало статьи оформляется по образцу: название, инициалы и фамилии авторов, полное название учреждения (или учреждений), в котором выполнена работа, почтовый адрес каждого учреждения с индексом, страна, адрес электронной почты. Далее приводится расширенная аннотация (до 1 страницы), а также ключевые слова. Аннотация должна включать цель работы, методике кратко и основные результаты. Кроме того, все эти данные необходимо представить на английском языке в конце рукописи на отдельной странице.

7. Рисунки желательно выполнять в формате PDF, обеспечивающем четкость всех деталей и возможности редактирования.

8. Материал статьи излагается в последовательности: введение, методика исследования, результаты и их обсуждение, выводы (заключение), список литературы. Эти подзаголовки должны быть указаны в тексте статьи.

**Заглавие** статьи должно быть информативным, включать ключевые слова.

**Аннотация** должна содержать главную информацию о статье: суть экспериментов, результаты и их интерпретацию.

**Во введении** нужно логически обосновать проведение данного исследования, показать актуальность и новизну, ответить на вопросы: что известно в данной области, что остается неизвестным, какова цель настоящей публикации.

**Методика исследования** должна содержать сведения: где, когда, на какой почве (субстрате) проводили опыты; агрохимическую характеристику и другие характеристики почвы с указанием методов определения; об условиях выращивания растений; об аналитических методах и использованных приборах и реактивах (с указанием фирмы на языке оригинала и производящей страны). Для малоизвестных или новых методов необходимо подробное их изложение с указанием всех примененных реактивов, при этом нужно приводить ошибку определения и чувствительность метода. Обязательно давать ссылку на классификацию, по которой дано название почвы.

При описании полевых опытов дозы удобрений, выраженные в кг/га N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и K<sub>2</sub>O, пишутся на строке (N90P60K60); для вегетационных опытов дозы питательных веществ (N, P, K), выраженные в мг/кг, пишутся в нижнем индексе (N<sub>100</sub>P<sub>75</sub>K<sub>100</sub>).

При описании опытов с культурами растений должны быть указаны их сорта. При упоминании видов растений необходимо приводить их латинское название и авторов классификации; названия микроорганизмов и грибов следует писать только на латыни. Родовые и видовые латинские названия растений, грибов и микроорганизмов надо печатать курсивом. Например, *Triticum aestivum* L., *Sinorhizobium meliloti*.

В конце методического раздела следует указать повторность в опыте, методы статистической обработки. Необходима статистическая обработка всех количественных данных. При ее использовании в методике нужно указать, что означает плюс-минус в таблицах и отклонение от среднего на графиках: стандартную ошибку среднего или стандартное отклонение. Если для данной задачи предложено несколько различающихся методов статистической обработки, то необходимо дать ссылку на конкретный использованный метод.

**Результаты и их обсуждение.** Изложение результатов должно заключаться в выявлении следящих из таблиц и рисунков закономерностей, а не пересказе их содержания.

Количественные данные, представленные без ошибок, округляются до 3-х значащих цифр. Например, величина 1044 округляется до 1040, 1045 – до 1050, величина 1.253 округляется до 1.25, 1.257 – до 1.26 и т.п.

Все виды ошибок (метрологические и статистические) приводить не более, чем с двумя значащими цифрами (начиная с первой ненулевой цифры слева); в соответствии с этим сами величины (в том числе средние) округляются до того же числа десятичных знаков, которые содержатся в их ошибке.

При обсуждении результатов следует сравнить полученную информацию с имеющейся в литературе и показать, в чем заключается ее новизна.

**Выводы (или заключение)** должны быть конкретными и вытекать из непосредственно полученного материала.

При описании методики, обсуждении результатов и в выводах следует употреблять глаголы в прошедшем времени.

9. В статье необходимо использовать физические единицы и обозначения, принятые в Международной системе единиц СИ (ГОСТ 8.417-2002 и РД 50-160-79), агрохимические термины – в соответствии с ОСТами 10 294-2002 – 10 297-2002. При названии различных химических соединений желательно использовать терминологию ИЮПАК. В таблицах употребляются символы химических элементов.

10. Все сокращения должны быть расшифрованы, за исключением небольшого числа общеупотребительных.

11. При обозначении удобрений (азотных, фосфорных, калийных, комплексных, сложных, смешанных) целесообразно пользоваться сокращениями:

$N_{aa}$  – аммоний азотнокислый (селитра аммиачная);

$N_a$  – аммоний сернокислый;

$N_m$  – мочевины (карбамид);

$N_c$  – селитра натриевая;

$N_{ck}$  – селитра калийная;

$N_{ckц}$  – селитра кальциевая;

$N_{ц}$  – цианамид кальция;

$N_{ва}$  – водный аммиак;

$N_{ба}$  – безводный аммиак;

$P_c$  – суперфосфат простой;

$P_{сг}$  – суперфосфат простой гранулированный;

$P_{сд}$  – суперфосфат двойной;

$P_{п}$  – преципитат;

$P_{оф}$  – обесфторенный фосфат;

$P_f$  – фосфоритная мука;

$P_{фш}$  – фосфатшлак;

$K_x$  – калий хлористый;

$K_c$  – калий сернокислый;

$K_{мг}$  – калимагнезия;

АФ – аммофос;

ДАФ – диаммофос;

ДАФК – диаммофоска;

АЗФК – азофоска;

КАФ – карбоаммофос;

КАФК – карбоаммофоска;

МФК – метафосфат калия;

НАФ – нитроаммофос;

НФ – нитрофос;

НФК – нитрофоска;

НАФК – нитроаммофоска;

ПФА – полифосфат аммония;

ФМ – фосфат мочевины;

ЖКУ – жидкое комплексное удобрение;

ОМУ – органо-минеральное удобрение, (с расшифровкой состава двух последних видов удобрений в разделе “Методика исследований”).

Другие сокращения необходимо расшифровать.

12. Формулы, на которые есть ссылки в тексте, должны быть пронумерованы. Пронумерованные формулы пишутся с красной строки, номер формулы ставится у правого края страницы в круглых скобках. Все ссылки в тексте на литературные источники даются на языке оригинала и нумеруются. Фамилии и названия на японском, китайском и других языках, использующих нелатинский алфавит, пишутся в русской транскрипции. Номера

ссылок в тексте должны идти строго по порядку упоминания и быть заключены в квадратные скобки.

13. Список литературы составляется по порядку упоминания работ в тексте статьи. Для всех библиографических источников приводятся фамилии и инициалы **всех** авторов и полное название цитируемой работы.

Примеры оформления библиографического описания

Для монографий:

*Кореньков Д.А.* Методы применения изотопа  $^{15}\text{N}$  в агрохимии. М.: Колос, 1977. 158 с.

*Hewitt E.L.* Plant mineral nutrition. London: The English University Press, 1974. 219 p.

Для сборников:

*Clarkson D.T.* Regulation of the absorption and release of nitrate by plant cell: a review of current ideas and methodology // Fundamental, ecological and agricultural aspect of nitrogen metabolism in higher plants. Dordrecht; Boston; Lancaster: Martinus Nijhoff Publishes, 1986. P. 3–27.

*Ловцова Н.М.* Влияние регуляторов роста на интенсивность дыхания укореняющихся зеленых черенков облепихи // Ростовые процессы и их регуляция / Под ред. Якушкиной Н.И. М.: МОПИ, 1992. С. 98–101.

*Ладонин В.Ф., Посмитная Л.В., Петросян А.Г.* К вопросу оценки загрязнения зерна озимой пшеницы в условиях комплексного применения средств химизации // Тез. докл. Всесоюзн. конф. "Почвенно-агрохимические и экологические проблемы формирования высокопродуктивных агроценозов". Пушино, 1988. С. 177.

Для трудов:

*Варзунова Т.А.* Влияние минеральных удобрений на урожай зерна горохоовсяной смеси // Тр. Сев.-Зап. ВНИИ молоч. и лугопастб. хоз-ва. 1971. Вып. 6. С. 17–20.

*Булгакова Н.Н.* Влияние дозы азота на включение в метаболизм нитрата запасного фонда при разных условиях выращивания // Бюл. ВИУА. № 112. 1999. С. 10–11.

Для журналов:

*Монастырский О.А.* Факторы эволюции высокотоксичных штаммов рода *Fusarium* в агроценозе // С.-х. биология. 1998. № 1. С. 28–34.

*Baer R.G., Collet F.G.* In vivo determination of parameters of nitrate utilization in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings grown with low concentration of nitrate in the nutrient solution // Plant Physiol. 1981. V. 68. № 6. P. 1237–1243.

Для авторефератов и диссертаций:

*Глянко А.К.* Реакция растительного организма на азотное питание и температуру среды (физиолого-экологические механизмы): Дис. ... д-ра биол. наук в форме научн. докл. Иркутск, 2000. 56 с.

*Котлярова Т.И.* Особенности усвоения азота корнями и листьями разных растений: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: ИФРАН СССР, 1987. 22 с.

Для патентных документов:

*Шаповалов А.А., Тацц В.П., Пуцын Ю.Г.* Соли 1-фенил-3-(1,2,4-триазол-4-ил) мочевины, обладающие свойством регуляторов роста растений: А. с. 1732651 (РФ) // Б.И. 1992. № 14. С. 25.

*Шаповалов А.А., Пуцыкин Ю.Г., Егоров Б.Ф.* Способ борьбы с сорными растениями, гербицидная композиция и синергист, повышающий активность гербицидов: Пат. 2130260, РФ // Б.И. 1998. № 5. С. 30.

14. Рукопись статьи направляется на рецензирование члену редколлегии журнала или ведущему специалисту в данной области исследований. Срок рецензирования статьи – 1 месяц. Положительная рецензия достаточна для приема к публикации. Если в рецензии имеются замечания, рукопись отправляется автору на переработку. Сроки переработки статьи – 4 месяца. Переработанную автором статью редакция направляет рецензенту на повторное рецензирование.

15. Статьи, оформленные без соблюдения изложенных правил, редакцией к рассмотрению не принимаются и возвращаются автору.

16. Рассылка отписок опубликованных статей осуществляется в электронном виде на адрес электронной почты, указанный авторами для переписки.

17. Плата за публикацию рукописей не взимается.