

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 4, 2021

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

- Коэффициенты использования NPK из минеральных удобрений и почвы сахарной свеклой в паровом и клеверном звене севооборота в ЦЧР
О. А. Минакова, Л. В. Александрова, Т. Н. Подвигина 3
- Содержание и распределение обменных катионов Са и Mg в профиле дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, мелиорированной возрастающими дозами доломитовых частиц крупного размера
А. В. Литвинович, И. В. Салаев, П. С. Манаков, О. Ю. Павлова, А. В. Лаврищев 9
- ЯМР-спектроскопия гуминовых кислот почв термокарстовых понижений и бугров пучения
Е. Ю. Мильхеев, Ю. Б. Цыбенков 22
-

Удобрения

- Использование агроклиматического потенциала серых лесных почв Верхневолжья при применении удобрений
В. В. Окорков, О. А. Фенова, Л. А. Окоркова 27
- Влияние удобрений на урожайность культур и вынос питательных элементов в зернопаросидеральном севообороте
П. А. Постников, В. В. Попова 42
- Влияние минеральных удобрений на плодородие дерново-подзолистой почвы, содержание основных элементов питания и тяжелых металлов в озимой ржи
Н. Е. Завьялова, М. Т. Васбиева, Д. Г. Шишков 49
-

Регуляторы роста растений

- Новый регулятор роста для растений риса
Л. В. Дядюченко, В. В. Тараненко, В. С. Муравьев 57
-

Пестициды

- Влияние загрязнения опрыскивателя остаточными количествами сульфонилмочевины и имидазолинона на продуктивность сахарной свеклы
Е. А. Дворянкин 62
-

Агроэкология

- Регулирование урожайности яровой пшеницы (*Triticum aestivum* L.) при выращивании в условиях дефицита влаги в почве путем применения молибдена в зависимости от уровня азотного питания
И. И. Серегина, Н. Т. Ниловская 70
- Влияние использования земель под объекты курортно-рекреационного назначения на состояние и свойства типичных дерново-карбонатных почв г. Сочи
А. М. Гребенников 79
-

Экотоксикология

- Эффективность ассоциаций растений семейства бобовых и ростстимулирующих бактерий для восстановления нефтезагрязненных почв
Е. В. Кузина, Г. Ф. Рафикова, Е. А. Столярова, О. Н. Логинов 87
-
-

Contents

No. 4, 2021

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

- Sugar Beet NPK Utilization Ratios from Fertilizers and Soil in Fallow and Clover Links of a Crop Rotation in the Central Black-Earth Region
O. A. Minakova, L. V. Alexandrova, T. N. Podvigina 3
- Content and Distribution of Exchange Cations Ca and Mg in the Profile of Sod-Podzolic Light Loamy Soil Reclaimed by Increasing Doses of Large-Sized Ddolomite Particles
A. V. Litvinovich, I. V. Salaev, P. S. Manakov, O. Yu. Pavlova, A. V. Lavrishchev 9
- NMR-Spectroscopy of Humic Acids in Soils of Thermokarst Depressions and Numerous Heaving Mounds
E. Y. Milkheev, Y. B. Tsybenov 22
-

Fertilizers

- Use of Agroclimatic Potential of the Gray Forest Soils of the Upper Volga Region in the Application of Fertilizers
V. V. Okorkov, O. A. Fenova, L. A. Okorkova 27
- Influence of the Mineral Fertilizers on Sod-Podzolic Soil Fertility, Content of Major Nutrients and Heavy Metals in Winter Rye
N. E. Zavyalova, M. T. Vasbieva, D. G. Shyshkov 42
- Influence of Fertilizers on Crop Yield and Removal of Nutrient Elements in Grain-Steep-Sideral Crop Rotation
P. A. Postnikov, V. V. Popova 49
-

Plant Growth Regulators

- New Growth Regulator for Rice Plants
L. V. Dyadyuchenko, V. V. Taranenko, V. S. Muraviev 57
-

Pesticides

- Influence of a Sprayer Pollution with Sulfonyl-Urea and Imidazolinone Residuals on Sugar Beet Productivity
E. A. Dvoryankin 62
-

Agroecology

- Regulation of Yield of Spring Wheat (*Triticum aestivum* L.) when Growing in Conditions of Moisture Deficiency in the Soil by Using Molybdenum, Depending on the Level of Nitrogen Nutrition
I. I. Seregina, N. T. Nilovskaya 70
- Influence of Land Use for Resort and Recreational Facilities on the State and Properties of Typical Sod-Carbonate Soils in Sochi
A. M. Grebennikov 79
-

Ecotoxicology

- Efficiency of Associations of Legume Plants and Growth-Stimulating Bacteria for Restoration of Oil-Contaminated Soils
E. V. Kuzina, G. F. Rafikova, E. A. Stolyarova, O. N. Loginov 87
-
-

КОЭФФИЦИЕНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ NPK ИЗ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ И ПОЧВЫ САХАРНОЙ СВЕКЛОЙ В ПАРОВОМ И КЛЕВЕРНОМ ЗВЕНЕ СЕВООБОРОТА В ЦЧР

© 2021 г. О. А. Минакова^{1,*}, Л. В. Александрова¹, Т. Н. Подвигина¹

¹ *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 15.09.2020 г.

После доработки 17.11.2020 г.

Принята к публикации 11.01.2021 г.

В паровом звене севооборота отмечено более полное использование сахарной свеклой P_2O_5 и K_2O минеральных удобрений, в клеверном звене – N. Более интенсивное потребление NPK почвы и удобрений культурой в звене с клевером выявлено при применении $N45P45K45$ + навоз 50 т/га в пару и $N120P120K120$ + навоз 50 т/га в пару. В звене с паром подобное действие оказывали системы $N120P120K120$ + навоз 50 т/га и $N135P135K135$ + навоз 25 т/га. Возврат азота в агроэкосистему под действием удобрений в паровом звене был больше на 21.8–164, P_2O_5 – на 5.37–77.9, K_2O – на 4.12–35.0%, чем в клеверном. Дозы $N135P135K135$ + навоз 25 т/га, $N190P190K190$ и $N120P120K120$ + навоз 50 т/га способствовали полному возврату N и P_2O_5 в обоих звеньях.

Ключевые слова: удобрения, сахарная свекла, коэффициент использования NPK из почвы, коэффициент использования NPK из удобрений, звено севооборота, пар, клевер, вынос.

DOI: 10.31857/S0002188121040104

ВВЕДЕНИЕ

Возделывание сахарной свеклы как рентабельной высокопродуктивной культуры сопряжено с применением большого количества удобрений [1]. Для комплексной оценки эффективности их внесения применяют такие показатели как коэффициенты использования питательных веществ из почвы и минеральных удобрений (КИП и КИУ), а возврат NPK в агроэкосистему оценивают с помощью коэффициента возмещения выноса (КВВ).

Коэффициенты использования питательных веществ из минеральных удобрений, навоза и почвы характеризуют особенности питания сельскохозяйственных культур. На данные показатели значительное влияние оказывают уровень удобрённости севооборотной площади, вид возделываемой культуры, они раскрывают отношение культур к элементам питания и степень их накопления в почве [2]. При исчислении данных показателей производят расчет выноса элементов питания, который учитывает урожайность, содержание сухого вещества и NPK на единицу массы культуры [3].

Сахарная свекла характеризуется невысоким содержанием NPK на единицу сухой массы: азота в корнеплодах содержится 0.8–1.0%, в ботве – 1.75, P_2O_5 – 0.32 и 0.4%, K_2O – 2.5 и 1% соответственно, тогда как в зерне озимой пшеницы их содержание более значительно и составляет 2.8, 0.85 и 0.5% соответственно [3, 4]. Но в связи с тем, что урожайность корнеплодов сахарной свеклы высокая (50–60 т/га), вынос N составляет 160–260, P_2O_5 – 48–80 и K_2O – 220–400 кг/га [4, 5]. Улучшение питания культуры способствует увеличению выноса NPK урожаем [6, 7], как вследствие роста урожайности, так и повышения содержания NPK в единице сухого вещества [3, 8–12].

Средний КИП P_2O_5 сахарной свеклой – очень невысокий и составляет 7–10%, K_2O и N – в несколько раз больше (25–30 и 20–25% соответственно), КИУ данной культуры равен 15–20, 50–60 и 50–60% соответственно [12]. Средства химизации изменяют КИП [13]. Возрастающие дозы удобрений способствуют снижению коэффициента использования элементов питания из минеральных удобрений [14, 15].

Важным показателем экологического состояния агроценоза является коэффициент возврата

(возмещения) выноса элементов питания (КВВ) — отношение прихода элементов к их расходу. Если оно >1 , то баланс положительный количественно настолько, насколько $\text{КВВ} > 1.0$, при $\text{КВВ} = 1.0$ — баланс нулевой, при $\text{КВВ} < 1.0$ — баланс отрицательный [16]. Данный показатель также подвержен значительному воздействию уровня удобрённости почвы. В исследованиях [13] он изменялся от 73 до 138%.

Возделывание сахарной свеклы в паровом и травяном звеньях длинно-ротационного севооборота обеспечивает получение разной урожайности корнеплодов [17]. Также возможны отличия в химическом составе сельскохозяйственной продукции вследствие дополнительного поступления азота с пожнивными и корневыми остатками клевера, возделываемого в звене клевер — озимая пшеница — сахарная свекла — однолетние травы — овес.

Цель работы — изучение динамики коэффициентов использования элементов питания из почвы, удобрений и коэффициента возмещения выноса в условиях длительного применения удобрений под сахарную свеклу в звеньях с паром и клевером зернопропашного севооборота в лесостепи ЦЧР.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в 2009–2017 гг. в стационарном опыте по внесению удобрений, который был заложен в 1936 г. и продолжается по настоящее время. Опыт представляет собой 9-польный зернопаропропашной севооборот. Чередуемость культур в севообороте следующее: черный пар — озимая пшеница — сахарная свекла — ячмень с подсевом клевера — клевер 1-го года пользования — озимая пшеница — сахарная свекла — травосмесь горох + овес — овес на зерно. В 2017 г. закончилась 9-я ротация севооборота.

Климат района исследования — умеренно-континентальный с неустойчивым увлажнением, ГТК (гидротермический коэффициент увлажнения по Селянинову) меняется в пределах 0.9–1.3.

Почва опытного участка — чернозем выщелоченный малогумусный среднемогучный тяжелосуглинистый. Агрохимическая характеристика почвы опытного участка: содержание гумуса — 4.89–5.61%, N-NO_3^- — 1.39–2.16 мг/100 г почвы, подвижного P_2O_5 — 10.6–18.8 мг/100 г почвы, K_2O — 10.2–15.2 мг/100 г почвы, H_r — 2.8–3.6 ммоль/100 г почвы, pH_{KCl} 4.9–5.4, V — 86–90%.

Минеральные удобрения вносили 2 раза за ротацию только под сахарную свеклу, навоз — 1 раз

за ротацию в черном пару, остальные культуры использовали последствие удобрений.

Изучали влияние последствие удобрений на урожайность культур в вариантах $\text{N45P45K45} + \text{навоз } 25 \text{ т/га}$ в пару, $\text{N90P90K90} + \text{навоз } 25 \text{ т/га}$ в пару, $\text{N135P135K135} + \text{навоз } 25 \text{ т/га}$ в пару, $\text{N45P45K45} + \text{навоз } 50 \text{ т/га}$ в пару, $\text{N120P120K120} + \text{навоз } 50 \text{ т/га}$ в пару, N190P190K190 и в контроле без удобрений. Определение урожайности сахарной свеклы производили методом пробных площадок в 3-х повторностях, посевная площадь делянки — 131.2 м², учетная — 10.8 м². Содержание NPK в сахарной свекле определяли по Куркаеву, вынос NPK, КИП, КИУ и КВВ — расчетным методом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что вынос N основной и побочной продукцией сахарной свеклы (корнеплодами и ботвой) в паровом звене составил 78.9–145, в клеверном — 88.5–145 кг/га, действие удобрений проявилось в повышении данного показателя относительно контроля на 30.1–83.3 и 25.4–63.8% соответственно (табл. 1). Наибольший вынос в обоих звеньях отмечен под влиянием системы удобрения $\text{N135P135K135} + \text{навоз } 25 \text{ т/га}$, также в паровом звене — в варианте $\text{N120P120K120} + \text{навоз } 50 \text{ т/га}$, в клеверном звене — в варианте N190P190K190 . На 8.08–12.2% больший вынос в звене с клевером (относительно парового звена) обеспечивался в контроле, при внесении $\text{N45P45K45} + \text{навоз } 25 \text{ т/га}$ и $\text{N45P45K45} + \text{навоз } 50 \text{ т/га}$, в звене с паром — на 5.93% (относительно клеверного) — в варианте N190P190K190 .

Вынос P_2O_5 основной и побочной продукцией сахарной свеклы в паровом звене составил 46.7–104, в клеверном — 53.6–96.5 кг/га, действие удобрений проявилось в повышении данного показателя относительно контроля на 48.4–122 и 24.8–80.0% соответственно. Наибольший вынос фосфора в обоих звеньях отмечен при внесении $\text{N135P135K135} + \text{навоз } 25 \text{ т/га}$ и N190P190K190 . Более высокий, на 14.4–14.8%, вынос P_2O_5 в клеверном звене был в контроле и при внесении $\text{N45P45K45} + \text{навоз } 50 \text{ т/га}$, в паровом звене вынос вырос на 14.7% в варианте $\text{N120P120K120} + \text{навоз } 50 \text{ т/га}$.

Вынос K_2O основной и побочной продукцией сахарной свеклы в паровом звене составил 166–285, в клеверном — 148–236 кг/га, действие удобрений проявилось в повышении данного показателя относительно контроля на 33.4–72.2 и 26.1–58.7% соответственно. Максимальный вынос в

обоих звеньях отмечался при действии систем удобрения N135P135K135 + навоз 25 т/га и N190P190K190. Более высокий, на 11.6–37.3%, вынос K_2O в большинстве вариантов обеспечивался в звене с паром, дозы N135P135K135 + навоз 25 т/га, N45P45K45 + навоз 25 т/га, N190P190K190 содействовали наибольшему превышению выноса элемента в паровом звене относительно клеверного.

КИП азота под сахарной свеклой в звене с паром составил 97.7–124% (табл. 2), разница в вариантах – 9.93–30.0%, в звене с клевером – 102–132 кг/га и 6.95–21.4% соответственно. Величина КИП азота >100 свидетельствовала о дополнительном поступлении элемента (вследствие нитрификации, при разложении растительных остатков, дегумификации). КИП азота в обоих звеньях был практически сопоставим, кроме вариантов с внесением навоза 50 т/га, а также в контроле, где его превышение в звене с клевером относительно звена с паром составило 22.5–30.4%.

Сопоставление КИП основных элементов питания выявило, что для P_2O_5 почвы он был наиболее низким. В звене с паром он составил 13.4–21.0%, в вариантах с применением удобрений он возрастал на 8.96–56.7% относительно контроля, в звене с клевером КИП данного элемента составил 14.8–19.5%, разница в вариантах опыта – 8.11–32.4%. Увеличение этого показателя относительно контроля на 10.8–17.4% было отмечено только в вариантах с навозом 50 т/га и N190P190K190. В звене с клевером системы удобрения N190P190K190, N135P135K135 + навоз 25 т/га, N45P45K45 + навоз 50 т/га и в контроле обеспечивали более высокий, на 4.84–34.3% КИП P_2O_5 относительно парового звена, а дозы N90P90K90 + навоз 25 т/га и N120P120K120 + навоз 50 т/га – на 13.5–21.6% в звене с паром.

КИП K_2O в звене с паром составил 35.3–55.8%, в звене с клевером – 39.1–47.5%. Действие удобрений значительно повышало данный показатель относительно контроля: в звене с паром – на 10.8–58.1%, в звене с клевером – на 5.88–21.5%, системы N135P135K135 + навоз 25 т/га в пару и N120P120K120 + навоз 50 т/га оказывали наибольшее влияние на увеличение показателя в обоих звеньях, а в звене с паром – также в варианте N190P190K190. В звене с паром отмечен более высокий относительно клеверного звена, на 6.53–34.8% КИП K_2O в вариантах N135P135K135 + навоз 25 т/га, N120P120K120 + навоз 50 т/га и N190P190K190, в звене с клевером относительно парового звена – на 10.8–16.6% в контроле и при внесении N45P45K45 + навоз 25 т/га.

Таблица 1. Вынос NPK сахарной свеклой в звене с паром и в звене с клевером, кг/га

N		P_2O_5		K_2O	
пар	клевер	пар	клевер	пар	клевер
Контроль (без удобрений)					
78.9	88.5	46.7	53.6	166	148
N45P45K45 + навоз 25 т/га					
103	111	69.3	66.9	242	191
N90P90K90 + навоз 25 т/га					
127	129	75.3	77.5	221	192
N135P135K135 + навоз 25 т/га					
147	145	94.9	96.5	285	208
N45P45K45 + навоз 50 т/га					
108	120	73.7	84.3	231	187
N120P120K120 + навоз 50 т/га					
143	145	104	90.7	283	236
N190P190K190					
145	137	92.9	93.7	254	204

Таблица 2. Коэффициент использования элементов питания из почвы сахарной свеклой в звене с паром и в звене с клевером, %

N		P_2O_5		K_2O	
пар	клевер	пар	клевер	пар	клевер
Контроль (без удобрений)					
108	133	13.4	16.7	35.3	39.1
N45P45K45 + навоз 25 т/га					
112	114	16.5	16.0	39.2	45.7
N90P90K90 + навоз 25 т/га					
109	109	18.0	14.8	39.1	40.6
N135P135K135 + навоз 25 т/га					
124	126	15.5	16.5	55.8	41.4
N45P45K45 + навоз 50 т/га					
97.7	127	14.6	19.6	40.5	39.9
N120P120K120 + навоз 50 т/га					
108	132	21.0	18.5	50.6	47.5
N190P190K190					
107	102	18.6	19.5	46.7	38.1

КИУ азота составил в звене с паром 27.5–40.7% (табл. 3), максимальная его величина отмечена в варианте N135P135K135 + навоз 25 т/га, минимальная – в варианте N45P45K45 + навоз 50 т/га. В звене с клевером КИУ азота составил 25.3–69.6%, максимальным он был при применении N45P45K45 + навоз 50 т/га, минимальным – N190P190K190, с увеличением доз удобрений

Таблица 3. Коэффициент использования элементов питания из минеральных удобрений сахарной свеклой в звеньях севооборота, %

N		P ₂ O ₅		K ₂ O	
пар	клевер	пар	клевер	пар	клевер
N45P45K45 + навоз 25 т/га					
31.2	50.0	39.3	29.6	127.5	95.6
N90P90K90 + навоз 25 т/га					
40.0	45.1	27.9	26.6	52.7	48.0
N135P135K135 + навоз 25 т/га					
40.7	41.9	32.7	31.8	79.8	44.0
N45P45K45 + навоз 50 т/га					
27.5	69.6	38.6	68.2	87.3	86.0
N120P120K120 + навоз 50 т/га					
34.9	46.7	39.5	30.9	78.4	72.6
N190P190K190					
34.6	25.3	24.3	21.1	46.3	29.3

произошло его повышение в паровом звене на 10.9–30.4% (кроме варианта N45P45K45 + навоз 50 т/га, где он снизился на 11.9%). В клеверном звене отмечено снижение этого показателя на 9.8–49.4% (кроме варианта N45P45K45 + навоз 50 т/га, где было отмечено повышение на 39.2%). Разница в вариантах каждого звена в первом случае составила 13.4–48.0 и во втором – 65.6–175% соответственно, а сравнение каждого варианта выявило, что этот показатель был выше в клеверном звене на 2.95–60.3% (кроме варианта N190P190K190). Наиболее высокой разница была при применении N45P45K45 + навоз 50 т/га, наиболее низкой – в варианте N135P135K135 + навоз 25 т/га.

КИУ P₂O₅ в звене с паром составил 24.3–39.5%, максимальной его величина была при применении N120P120K120 + навоз 50 т/га и N45P45K45 + навоз 25 т/га, минимальной – в варианте N190P190K190. В звене с клевером КИУ P₂O₅ был равен 21.1–68.2%, наиболее высоким он был при действии N45P45K45 + навоз 50 т/га, наиболее низким – в варианте N190P190K190. С увеличением доз удобрений произошло его снижение в паровом звене на 16.8–38.2% (кроме вариантов с навозом 50 т/га, где он оставался на уровне контроля). В клеверном звене была отмечена тенденция к его снижению до 28.7%. Только вариант N45P45K45 + навоз 50 т/га обеспечивал значительное повышение показателя на 130%. Разница в вариантах каждого звена составила 14.2–62.5 и 26.1–223% соответственно, а сравнение каждого варианта в разных звеньях выявило,

что этот показатель был больше в паровом звене на 2.83–32.8% (кроме варианта N45P45K45 + навоз 50 т/га). Наиболее значительная разница была отмечена при действии N45P45K45 + навоз 50 т/га, наиболее низкая – в варианте N135P135K135 + навоз 25 т/га.

КИУ K₂O составил в звене с паром 46.3–128, в звене с клевером – 29.3–95.6%, максимальной его величина была при применении N45P45K45 + навоз 25 т/га, минимальной – в варианте N190P190K190 в обоих звеньях. С увеличением доз удобрений произошло его снижение как в паровом, так и клеверном звеньях на 31.5–63.7 и 10.0–69.3% соответственно. Сравнение каждого варианта удобрений в разных звеньях выявило, что этот показатель был больше в паровом звене на 1.51–58.0%, максимальная разница была отмечена в варианте N190P190K190, минимальная – при применении N45P45K45 + навоз 50 т/га.

КВВ в паровом звене составил: N – 0.742–1.31, P₂O₅ – 0.830–2.04 и K₂O – 0.248–0.749, в клеверном звене – 0.376–1.39, 0.534–2.03 и 0.235–0.931 соответственно (табл. 4). Во всех вариантах опыта коэффициент возмещения выноса K₂O в обоих звеньях, N – в клеверном звене, а также P₂O₅ в обоих звеньях при внесении N45P45K45 + навоз 50 т/га и N45P45K45 + навоз 25 т/га не достигал 1, что свидетельствовало о неполноте их возврата в экосистему. Полный возврат с некоторым превышением при внесении большинства доз удобрений отмечался для N в паровом звене, а также для P₂O₅ как в паровом, так и в клеверном звене. Различия КВВ в вариантах в паровом звене были значительно меньше, чем в клеверном звене: для азота они составили 28.2–77.0, для P₂O₅ – 14.6–145, для K₂O – 30.6–131%, тогда как в клеверном звене они были равны 7.72–270, 26.0–202 и 100–296% соответственно. КВВ азота в паровом звене превышал таковой в клеверном звене на 21.8–164, P₂O₅ – на 5.37–77.9, K₂O – на 4.12–35.0 (кроме варианта N190P190K190).

ВЫВОДЫ

1. Более высокий вынос K₂O, в меньшей степени N и P₂O₅ основной и побочной продукцией сахарной свеклы отмечен в паровом звене. Удобрения, примененные в этом звене, способствовали более значительному увеличению выноса NPK, чем в клеверном звене, максимально возрастал вынос P₂O₅ (на 48.4–122 и 24.8–80.0% относительно контроля соответственно), минимально – K₂O (на 33.4–72.2 и 26.1–58.7%).

Таблица 4. Коэффициент возмещения выноса НРК в звеньях зерносвекловичного севооборота

N		P ₂ O ₅		K ₂ O	
пар	клевер	пар	клевер	пар	клевер
N45P45K45 + навоз 25 т/га					
0.742	0.405	0.830	0.673	0.248	0.235
N90P90K90 + навоз 25 т/га					
0.951	0.697	1.36	1.16	0.475	0.470
N135P135K135 + навоз 25 т/га					
1.13	0.931	1.55	1.40	0.526	0.650
N45P45K45 + навоз 50 т/га					
0.991	0.376	0.950	0.534	0.324	0.240
N120P120K120 + навоз 50 т/га					
1.28	0.830	1.39	1.32	0.530	0.509
N190P190K190					
1.31	1.39	2.04	2.03	0.749	0.931

2. Высокие дозы удобрений (N135P135K135 + навоз 25 т/га, N120P120K120 + навоз 50 т/га и N190P190K190), примененные как в паровом, так и в клеверном звеньях севооборота, способствовали наиболее значительному выносу на вынос N и P₂O₅. В звене с паром системы удобрения N135P135K135 + навоз 25 т/га, N120P120K120 + навоз 50 т/га в большей степени влияли на вынос K₂O, в звене с клевером – системы N135P135K135 + навоз 25 т/га, N120P120K120 + навоз 50 т/га и N190P190K190.

3. Применение удобрений способствовало повышению коэффициенту использования из почвы (КИП) основных элементов питания как в паровом (в большей степени), так и в клеверном звене (в меньшей степени). Сопоставление КИП вариантов удобрения в разных звеньях севооборота не выявило четкой закономерности его изменения, но при этом в клеверном звене был выявлен более высокий КИП азота в контроле, P₂O₅ и K₂O – при применении N45P45K45 + навоз 50 т/га, а в паровом звене система N120P120K120 + навоз 50 т/га обеспечивала наиболее высокий КИП P₂O₅ и K₂O.

4. В клеверном звене отмечено более высокое использование азота минеральных удобрений, но более низкое – P₂O₅ и K₂O по сравнению с паровым звеном. В паровом звене был выявлен более высокий коэффициент использования из удобрений (КИУ) P₂O₅ (кроме варианта N45P45K45 + навоз 50 т/га), чем в клеверном звене (24.3–39.5% и 21.1–31.8% соответственно) и K₂O (46.3–128% и 29.3–95.6% соответственно). Применение

удобрений в паровом звене способствовало меньшему изменению КИУ относительно контроля, чем в клеверном. Более всего изменялась величина КИУ азота, в меньшей степени – P₂O₅. Максимальное использование P₂O₅ и K₂O в паровом звене обеспечивали системы удобрения N45P45K45 + навоз 50 т/га, N120P120K120 + навоз 50 т/га, N – N90P90K90 + навоз 25 т/га и N135P135K135 + навоз 25 т/га, последняя доза также способствовала созданию высокого КИУ K₂O.

5. Величина коэффициента возмещения выноса (КВВ) в паровом звене показала, что возврат азота в экосистему был больше на 21.8–164, P₂O₅ – на 5.37–77.9, K₂O – на 4.12–35.0%, чем в клеверном звене. Системы удобрения N135P135K135 + навоз 25 т/га, N190P190K190 и N120P120K120 + навоз 50 т/га способствовали полному возврату азота и P₂O₅ в обоих звеньях. Разница между удобрениями вариантами в паровом звене в зависимости от величины КВВ была меньше, чем в клеверном звене, что свидетельствовало о более интенсивном пополнении баланса НРК в звене с паром.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дзюин Г.П., Дзюин А.Г. Коэффициенты использования азота, фосфора и калия из минеральных удобрений, навоза и почвы культурами севооборота // *Международ. журн. эксперимент. образования*. 2016. № 5 (Ч. 1). С. 83–90.
2. Шаковец О.Е. Вынос и коэффициенты использования элементов питания озимой ржи при различных системах удобрения // *Почвовед. и агрохим.* 2009. № 2 (43). С. 129–136.
3. Смирнов П.М., Муравин Э.А. *Агрохимия*. М.: Колос, 1977. 240 с.
4. Петербургский А.В. *Агрохимия и физиология питания растений*. М.: Россельхозиздат, 1981. 184 с.
5. Гвоздев Н.В. Влияние удобрений и мелиорантов на урожайность и качество корнеплодов сахарной свеклы: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Каменная степь, 2005. 24 с.
6. Durrant M.J., Draycott A.P. Uptake of magnesium and other fertilizer elements by sugar beet grown on sandy soils // *J. Agricult. Sci.* 1971. V. 77. Iss. 1. № 8. P. 61–68.
7. Fathy M.F. Abdel-Motagally and Kamal K. Attia. Response of sugar beet plants to nitrogen and potassium fertilization in sandy calcareous soil // *Inter. J. Agricult. Biol.* Doi: 09-152/AWB/2009/11-6-695-700
8. Заришняк А.С., Руцкая С.И., Колибабчук Т.В. Влияние удобрений на потребление элементов питания культурами зерносвекловичного севооборота на черноземе оподзоленном // *Агрохимия*. 2003. № 6. С. 39–46.
9. Жердецкий И.Н., Заришняк А.С., Ступенко А.В. Влияние некорневой подкормки микроудобрени-

- ями на продуктивность сахарной свеклы и содержание в ней макроэлементов // *Агрохимия*. 2010. № 10. С. 20–27.
10. Федотова Е.Н., Рысев М.Н. Влияние удобрений на вынос питательных веществ основной и побочной продукцией и коэффициенты использования их из минеральных удобрений // *Изв. Великолукской ГСХА*. 2016. № 2. С. 21–23.
 11. Кожокина А.Н., Мязин Н.Г., Столповский Ю.И. Влияние многолетнего применения удобрений на урожайность корнеплодов и вынос элементов питания сахарной свеклой // *Актуальные проблемы агрономии современной России и пути их решения*. Мат-лы Международ. научн.-практ. конф., посвящ. 105-летию факультета агрономии, агрохимии и экологии. Воронеж: ВоронежГАУ, 2018. С. 174–180.
 12. Гуреев И.И., Агibalов А.В. Производство сахарной свеклы без затрат ручного труда. Курск: ВНИИЗ и ЗПЭ, 2000. 124 с.
 13. Карабутов А.П., Уваров Г.И., Тютюнов С.И. Влияние агроприемов на режим калия чернозема типичного // *Достиж. науки и техн. АПК*. 2014. № 8. С. 36–38.
 14. Дуйшембиев Н.Д., Ахматбеков М.А., Мамбетов К.М.Ш.Б., Жайнакова Г.Л.Б., Эмил У.У. Коэффициенты использования элементов питания растениями в севообороте, при длительном применении удобрений // *Вестн. Кыргыз. нац. аграрн. ун-та им. К.И. Скрябина*. 2018. № 2(47). С. 51–58.
 15. Плотников А.М., Кабдунова Г.С. Баланс элементов питания и продуктивность зернопарового севооборота при применении минеральных удобрений // *Пробл. агрохим. и экол.* 2018. № 1. С. 38–41.
 16. Баланс элементов питания в почвах. [Электр. ресурс]. РГАУ–МСХА, зооинженер. фак-т. <https://www.activestudy.info/balans-elementov-pitaniya-v-pochvax/> (дата обращения 22.07.2020).
 17. Жеряков Е.В. Влияние предшествующей культуры и звена севооборота на засоренность посевов и показатели продуктивности сахарной свеклы // *Пробл. совр. науки и образования*. 2014. № 8 (26). С. 38–41.

Sugar Beet NPK Utilization Ratios from Fertilizers and Soil in Fallow and Clover Links of a Crop Rotation in the Central Black-Earth Region

O. A. Minakova^{a,#}, L. V. Alexandrova^a, and T. N. Podvigina^a

^aA. L. Mazlumov All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar
p. VNISS 86, Ramonsky district, Voronezh region 396030, Russia

[#]E-mail: olalmin2@rambler.ru

More full use of P₂O₅ and K₂O mineral fertilizers by sugar beet was noted in fallow link of a grain–beet crop rotation, and the same was marked for N in clover link. In the link with clover, more intensive use of soil and fertilizers NPK by sugar beet was noted when using the systems of N45P45K45 + manure 50 t/ha in fallow and N120P120K120 + manure 50 t/ha in fallow. In the link with fallow, the systems of N120P120K120 + manure 50 t/ha in fallow and N135P135K135 + manure 25 t/ha in fallow had a similar effect. Under influence of fertilizers, return of nitrogen to agricultural ecological system in the fallow link was by 21.8–164% more than in the clover one. Return of P₂O₅ and K₂O under the same conditions was by 5.37–77.9 and 4.12–35.0% more, correspondingly. The doses of N135P135K135 + manure 25 t/ha and N190P190K190 and N120P120K120 + manure 50 t/ha promoted entire return of N and P₂O₅ in both links.

Key words: fertilizers, sugar beet, NPK utilization ratio from soil, NPK utilization ratio from fertilizers, crop rotation link, fallow, clover, removal.

УДК 631.416:631.445.24:631.821

СОДЕРЖАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОБМЕННЫХ КАТИОНОВ Ca И Mg В ПРОФИЛЕ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ЛЕГКОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ, МЕЛИОРИРОВАННОЙ ВОЗРАСТАЮЩИМИ ДОЗАМИ ДОЛОМИТОВЫХ ЧАСТИЦ КРУПНОГО РАЗМЕРА

© 2021 г. А. В. Литвинович^{1,*}, И. В. Салаев¹, П. С. Манаков¹,
О. Ю. Павлова¹, А. В. Лаврищев²

¹Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 Санкт-Петербург, Гражданский просп., 14, Россия

²Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
196601 Санкт-Петербург—Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Россия

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

Поступила в редакцию 07.05.2020 г.

После доработки 02.08.2020 г.

Принята к публикации 11.01.2021 г.

В длительном 10-вариантном полевом опыте и в серии лабораторных экспериментов изучена миграционная подвижность кальция и магния в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорированной крупными по размеру частицами доломитовой крошки. Установлено, что доломитовые частицы крупного размера не являлись “балластом”. При попадании в почву они постепенно растворялись. Ежегодно, после уборки растений в почве, мелиорированной частицами доломита размером 5–7 и 7–10 мм, остается определенный запас подвижных катионов Ca и Mg. Чем выше была доза применения и мельче размер частиц доломита, тем этот запас больше. В опытах на колонках показано, что фонд способных к миграции катионов Ca и Mg в почве, мелиорированной доломитовыми частицами 5–7 и 7–10 мм, в количестве, соответствующем 3 и 5 полным дозам, рассчитанным по гидролитической кислотности (H_f), за 6 опыто-лет уступал количеству Ca и Mg, мигрирующим из почвы, известкованной доломитовой мукой (ДМ) в научно обоснованной дозе (1 H_f). Это открывает возможность безопасного применения крупных фракций доломитовой крошки в заведомо завышенных дозах в качестве мелиоранта пролонгированного действия. Применение отсева без разделения на фракции в дозе 3 H_f вызывало определенные опасения из-за высоких непроизводительных потерь кальция и магния с просачивающейся влагой атмосферных осадков и нуждалось в дополнительном изучении. Проведено ранжирование отдельных вариантов опыта по количеству щелочноземельных металлов, удаляемых из почвы при промывании. Выявлено, что миграционная подвижность кальция в зависимости от варианта опыта превосходила количество вымытого магния в 1.9–3.1 раза. Приведены кривые содержания и распределения щелочноземельных металлов в отдельных горизонтах ненарушенного профиля почвы, мелиорированной высокими дозами частиц доломитовой крошки различного размера. Положительное влияние крупных частиц доломита, использованного в качестве известкового материала, на урожайность растений установлено во всех изученных вариантах.

Ключевые слова: мелиорация, отсев щебеночного производства, почва, миграция, щелочноземельные металлы, модельный опыт.

DOI: 10.31857/S0002188121040086

ВВЕДЕНИЕ

Дерново-подзолистые почвы в естественном состоянии обладают целым рядом неблагоприятных свойств, ограничивающих получение на них высоких и устойчивых урожаев. Основными приемами их улучшения являются известкование и окультуривание.

Химическая мелиорация почв оказывает длительное и всестороннее влияние на все компо-

ненты почвы [1]. Однако она не может изменить биоклиматические условия, при которых почвы становятся кислыми. Положительные изменения, достигнутые в результате известкования, постепенно утрачиваются, а известкование, как прием, необходимо систематически повторять [2].

Главной причиной подкисления почв с промывным типом водного режима служат высокие потери щелочных и щелочноземельных металлов

с просачивающейся влагой атмосферных осадков [1, 3–5].

В лаборатории мелиорации почв АФИ длительное время проводят исследования, направленные на установление миграционной подвижности макро- и микроэлементов под действием ирригационных мероприятий и влаги атмосферных осадков [6–19]. Разработаны эмпирические модели, адекватно описывающие потери щелочноземельных металлов в результате миграции [18–20].

Несмотря на значительный фактический материал, посвященный потерям оснований из почв с промывным водным режимом, данных сопряженного изучения миграционной подвижности Са и Mg в мелиорированных почвах недостаточно. Это особенно касается вопроса потери этих элементов из дерново-подзолистых почв, известкованных доломитом, содержащим в своем составе сопоставимое количество карбонатов кальция и магния.

При производстве щебня из карбонатных пород в отвалы отсеиваются частицы доломитовой крошки размером <10 мм. Содержание СаСО₃ в доломите 46.1, MgСО₃ – 38.4%. В работах [21–24] приведены данные гранулометрического состава отсева, изучена скорость растворения и показана высокая эффективность использования частиц доломита размером <0.25 мм, 0.25–1.0 мм, 1–3 и 3–5 мм для нейтрализации почвенной кислотности. Установлено снижение подвижности фитотоксичных катионов марганца и железа при применении этих фракций для известкования в научно обоснованной дозе [25, 26]. В настоящее время устанавливается возможность использования заведомо завышенных доз частиц доломитовой крошки размером 5–7 и 7–10 мм в качестве мелиоранта пролонгированного действия [27–29]. Теоретической предпосылкой проведения такого рода исследований является известный факт, что по мере увеличения дозы применения мелиоранта значение тонины помола снижается [30].

Однако при принятии решения о возможности широкого использования крупных частиц доломитовой крошки для известкования необходимо ответить на 2 основных вопроса: 1 – насколько растворимы в почвах частицы данного размера (не являются ли крупные фракции доломита “балластом”)?, 2 – напротив, не приведет ли использование этих фракций в заведомо завышенных дозах к усилению непродуцируемых потерь Са и Mg в результате миграции?

Цель работы – изучение содержания и профильного распределения обменных катионов Са и Mg в дерново-подзолистой легкосуглинистой

почве, мелиорированной возрастающими дозами крупных фракций доломитовой крошки. В задачи исследования входило: в условиях длительного (6 опыто-лет) 10-вариантного полевого опыта определить количество водорастворимых катионов Са и Mg, ежегодно остающихся в известкованной почве после завершения вегетационного периода сельскохозяйственных культур; в лабораторных экспериментах на колонках во всем промежутке времени изучения выявить “фонд” способных к миграции катионов Са и Mg при промачивании мелиорированной почвы после уборки растений; провести ранжирование отдельных вариантов опыта по масштабу потерь катионов в результате миграции; установить соотношение интенсивности миграции щелочноземельных металлов из мелиорированной почвы; спустя 6 опыто-лет после известкования определить содержание и распределение обменных катионов Са и Mg в ненарушенном профиле мелиорированной почвы; установить влияние крупных частиц доломита, использованного в качестве известкового материала, на урожай растений за 6 опыто-лет.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для достижения поставленной цели в 2015 г. на Меньковской опытной станции АФИ был заложен микрополевым опытом. Схема опыта включала 10 вариантов (табл. 1) в четырехкратной повторности. Опыт был заложен в полиэтиленовых сосудах без дна ($S = 1 \text{ м}^2$, глубина – 25 см, масса – 300 кг почвы/сосуд). Перед закладкой опыта из каждой делянки (сосуда) была извлечена почва на глубину пахотного слоя (0–25 см). По периметру делянки размещали полиэтиленовую пленку. Внутри полученного таким образом сосуда помещали специально завезенную предварительно известкованную и удобренную дерново-подзолистую почву.

Физико-химические показатели почвы были следующими: содержание гумуса – 2.18%, $\text{pH}_{\text{КС1}}$ 4.6, H_r – 4.9 ммоль(экв)/100 г почвы, содержание частиц <0.01 мм – 21.4%. Валовый химический состав почвы представлен в табл. 1. Выбранная для исследования почва относится к категории среднекислых и характеризуется невысоким валовым содержанием кальция и магния.

Известкование крупными фракциями доломита размером 5–7 и 7–10 мм проводили в количестве, соответствующем 1, 3 и 5 полным дозам, рассчитанным по гидролитической кислотности (H_r). Кроме этого, в схему опыта были включены варианты с естественной смесью фракций (ЕСМ) отсева в дозах 1 и 3 H_r . Для сравнения использова-

Таблица 1. Валовой химический состав дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы, % на бескарбонатную и безгумусную почву

Потеря при прокаливании	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	P ₂ O ₅	SO ₃	MnO	Σ
5.12	81.2	2.31	8.96	0.37	0.39	0.09	0.63	0.52	99.6

ли вариант с доломитовой мукой (ДМ), которую применяли в научно обоснованной дозе (1 Н_г). ДМ готовили из отсева, просеянного через сито с диаметром отверстий 0.25 мм.

В опыте возделывали культуры, отзывчивые на известкование и характеризующиеся высокой потребностью в Ca и Mg, как элементах питания. В 2015 г. выращивали горох, в 2016 и 2017 гг. – горчицу и горох, в 2018 г. – горчицу. Уборку растений проводили в фазе цветения. Удобрения применяли ежегодно. Перед закладкой опыта вносили 60 г д.в. АФК/на делянку (N : P : K = 16 : 16 : 16), в последующие годы перед посевом гороха вносили 30 г, перед посевом горчицы – 18 г д.в. АФК/на делянку.

Методика лабораторных исследований заключалась в следующем. Ежегодно после уборки растений в отдельных вариантах опыта отбирали почву на глубину обрабатываемого слоя (0–25 см). Почву высушивали, измельчали, просеивали сквозь сито с отверстиями 1 мм и помещали в колонки. Масса почвы в колонке 600 г. Плотность набивки 1.0–1.1 г/см³. Перед помещением в колонки и после промывания в почве отдельных вариантов устанавливали суммарное содержание водорастворимых Ca и Mg.

Для промывания каждой колонки использовали полуторакратный объем воды, ежегодно просачивающейся сквозь почвенно-грунтовую толщу. Расчет необходимого количества влаги для одного промывания представлен в работах [9, 13, 32]. Для промывания каждой колонки использовали дистиллированную воду в объеме 1200 мл. Повторность четырехкратная. В фильтрах после промывания определяли содержание Ca и Mg.

Полевые наблюдения заключались в следующем. Спустя 6 опыто-лет проведения эксперимента после уборки последнего урожая горчицы почвенным буром с шагом 10 см с каждой делянки (сосуда) отбирали образцы почвы до глубины 70 см. Далее послонно проводили определение обменных катионов Ca и Mg по ГОСТ 26487-85 [33]. Данные определений обработаны методами математической статистики.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Данные содержания водорастворимых катионов Ca и Mg в почве разных вариантов опыта до и после промывания за 6 опыто-лет проведения

эксперимента сведены в табл. 2. Результаты свидетельствуют, что вне зависимости от дозы применения и размера частиц мелиоранта в почве после уборки растений сохранялся определенный запас водорастворимых катионов Ca и Mg. Спустя 1 год после известкования и уборки растений гороха остаточное количество способных к миграции катионов было наибольшим. На 2-й, 3-й, 4-й, 5-й и 6-й опыто-год количество Ca и Mg, переходящих в водную вытяжку, было меньше, чем после уборки первого урожая гороха. Во все сроки наблюдений в большинстве изученных вариантов прослежена следующая закономерность: чем выше доза применения крупных частиц доломита, тем запас водорастворимых катионов Ca и Mg, остающихся в почве после уборки растений, больше. Таким образом, полученные данные свидетельствуют, что крупные частицы доломитовой крошки не являлись “балластом”. С течением времени они растворялись, способствуя обогащению почвы доступными для растений катионами кальция и магния.

Каких-либо закономерностей, связанных с влиянием размера частиц, внесенных в эквивалентных дозах, на количество Ca и Mg, остающихся в почве после уборки растений, за 6 опыто-лет эксперимента не выявлено. При этом количество способных к миграции Ca и Mg в почве, произвесткованной ДМ в дозе 1 Н_г, было больше, чем в вариантах с применением крупных частиц доломита в дозах 3 и 5 Н_г. Следовательно, угрозы роста непроизводительных потерь этих элементов при использовании высоких доз крупных фракций по сравнению с применением ДМ в научно обоснованной дозе, на протяжении 6 опыто-лет не установлено.

Увеличение количества примененной смеси доломитовых частиц без разделения на фракции с одной до 3-х доз, рассчитанных по 1 Н_г, также приводило к росту запаса доступных для вымывания катионов Ca и Mg. Причем количество способных к миграции Ca и Mg в варианте с применением ЕСМ по 3 Н_г на 4-й и 6-й опыто-год (после уборки горчицы) было больше, а спустя 5 опыто-лет (после уборки гороха) соответствовало суммарному количеству водорастворимых катионов Ca и Mg в почве, мелиорированной ДМ в научно обоснованной дозе. Это создавало предпосылки для усиления непроизводительных потерь Ca и Mg в ре-

Таблица 2. Содержание водорастворимых катионов Са и Mg в почве до и после промывания, ммоль(экв)/100 г почвы

Срок наблюдений (культура)	Варианты									
	1. NPK (фон)	2. Фон + ДМ 1 Н _г	3. Фон + М (5–7 мм) 1 Н _г	4. Фон + М (5–7 мм) 3 Н _г	5. Фон + М (5–7 мм) 5 Н _г	6. Фон + М (7–10 мм) 1 Н _г	7. Фон + М (7–10 мм) 3 Н _г	8. Фон + М (7–10 мм) 5 Н _г	9. Фон + смесь М 1 Н _г	10. Фон + смесь М 3 Н _г
1-й опыто-год (горох)	До промывания									
	1.30	2.56	1.40	1.30	1.56	1.18	1.30	1.92	1.98	2.50
2-й опыто-год (горчица)	После промывания									
	0.25	0.28	0.21	0.11	0.20	0.23	0.19	0.22	0.20	0.29
3-й опыто-год (горох)	До промывания									
	0.12	0.16	0.08	0.16	0.14	0.06	0.06	0.22	0.06	0.12
4-й опыто-год (горчица)	После промывания									
	0.11	0.14	0.03	0.14	0.12	0.04	0.02	0.13	0.04	0.07
5-й опыто-год (горох)	До промывания									
	0.08	0.28	0.08	0.06	0.08	0.04	0.12	0.12	0.06	0.18
6-й опыто-год (горчица)	После промывания									
	0.05	0.24	0.04	0.04	0.05	0.02	0.04	0.06	0.05	0.10
7-й опыто-год (горох)	До промывания									
	0.06	0.08	0.04	0.06	0.06	0.04	0.04	0.08	0.08	0.10
8-й опыто-год (горчица)	После промывания									
	0.04	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.04	0.04	0.04
9-й опыто-год (горох)	До промывания									
	0.02	0.20	0.14	0.14	0.18	0.04	0.08	0.12	0.06	0.20
10-й опыто-год (горчица)	После промывания									
	0.04	0.06	0.05	0.04	0.04	0.05	0.05	0.04	0.02	0.06
11-й опыто-год (горох)	До промывания									
	0.42	0.20	0.10	0.18	0.22	0.10	0.14	0.16	0.14	0.22
12-й опыто-год (горчица)	После промывания									
	0.14	0.08	0.08	0.14	0.12	0.08	0.10	0.12	0.10	0.18

зультате их миграции из почвы этого варианта опыта. Таким образом, применение высоких доз доломитовой крошки без разделения на фракции вызывало определенные опасения и нуждается в дополнительных исследованиях.

В контрольном варианте опыта на протяжении 5-ти опыто-лет запас водорастворимых катионов Са и Mg постепенно снижался. На 6-й опыто-год, после завершения эксперимента количество способных к миграции катионов резко возрастало. Причины этого будут рассмотрены ниже. В целом вне зависимости от варианта опыта в почве после уборки растений оставался определенный запас способных к миграции катионов Са и Mg.

После промывания почвы объемом, соответствующим полуторакратному количеству ежегод-

но просачивающейся сквозь почвенно-грунтовую толщу влаги, установлена отчетливо выраженная тенденция к снижению количества катионов кальция и магния. Однако полного удаления изученных элементов ни в одном из вариантов опыта достичь не удалось.

Количество Са и Mg в промывных водах за весь период эксперимента представлено в табл. 3. Результаты свидетельствуют, что объем мигрирующих катионов Са и Mg из почвы контрольного варианта опыта по мере проведения эксперимента возрастал. Спустя год после закладки опыта количество вымытых из почвы катионов было равно 25.3 мг. На момент завершения наблюдений спустя 6 опыто-лет оно составило 40.5 мг.

Таблица 3. Миграционные потери Ca и Mg при промывании почвы после уборки растений, мг

Срок наблюдений	Варианты										НСР ₀₅
	1. НРК (фон)	2. Фон + ДМ 1 Н _Г	3. Фон + М (5–7 мм) 1 Н _Г	4. Фон + М (5–7 мм) 3 Н _Г	5. Фон + М (5–7 мм) 5 Н _Г	6. Фон + М (7–10 мм) 1 Н _Г	7. Фон + М (7–10 мм) 3 Н _Г	8. Фон + М (7–10 мм) 5 Н _Г	9. Фон + смесь М 1 Н _Г	10. Фон + смесь М 3 Н _Г	
1. Горох											
Ca	21.5	506	101	210	239	74.1	161	248	110	259	—
Mg	3.8	217	19.6	71.4	99.5	18.1	57.3	113	44.9	87.2	—
Σ	25.3	722	120	281	338	92.2	218	361	155	346	
Доля от суммарно вымытого за 6 лет, %	10	60.6	25.1	37.5	38.5	25.3	39.9	43.4	25.9	36.5	
2. Горчица											
Ca	21	49.0	36.2	44.9	53.3	38.8	49.3	51.7	49.3	77.7	5.8
Mg	14.3	25.2	14.8	35.0	29.3	13.7	21.2	28.4	24.2	41.1	7.9
Σ	35.3	74.2	51.0	79.9	82.6	52.5	70.5	80.1	73.5	118.8	
Доля от суммарно вымытого за 6 лет, %	14	6.2	10.6	10.7	9.4	14.4	12.9	9.6	12.3	12.5	
3. Горох											
Ca	36.2	63.8	38.1	56.4	58.4	33.3	36.7	66.3	80.2	111.6	8.6
Mg	16.7	39.9	8.9	46.8	31.8	14.2	17.0	41.8	43.5	75.4	10.6
Σ	52.9	103.7	47.0	103.2	90.2	47.5	53.7	108.1	123.7	187.0	
Доля от суммарно вымытого за 6 лет, %	21	8.7	9.8	13.8	10.3	13	9.8	13	20.7	19.7	
4. Горчица											
Ca	21.5	40.2	31.3	31.6	55.2	27	30	50.6	42	53.3	4.6
Mg	5.6	26.2	13.5	20.0	38.6	11	12	33.7	30.2	45.1	5.5
Σ	27.1	66.4	44.8	51.6	93.8	38	42	84.3	72.2	98.4	
Доля от суммарно вымытого за 6 лет, %	10.7	5.8	9.3	6.9	10.7	10.4	7.7	10.1	12.1	10.4	
5. Горох											
Ca	53.7	79.8	108	90.7	95.0	66.7	56.0	62.4	58.2	74.2	12.8
Mg	17.6	65.5	35.7	44.5	57.4	26.4	26.9	33.4	31.7	39.4	7.5
Σ	71.3	145	144	135	152	93.1	82.9	95.8	89.9	114	
Доля от суммарно вымытого за 6 лет, %	28.3	12.1	30	18	17.3	25.6	15.2	11.5	15	12	
6. Горчица											
Ca	31.7	53.0	49.0	60.6	74.9	29.9	50.4	65.9	52.8	54.6	10.1
Mg	8.8	26.3	23.9	37.6	46.3	11.2	28.4	36.8	31.2	30.2	6.4
Σ	40.5	79.3	72.9	98.2	121	41.1	78.8	103	84.0	84.8	
Доля от суммарно вымытого за 6 лет, %	16	6.6	15.2	13.1	13.8	11.3	14.5	12.4	14	8.9	
Всего за 6 опыто-лет											
Ca	186	792	364	494	576	270	383	545	393	631	
Mg	66.8	400	116	255	303	94.6	163	287	206	318	
Σ	252	1190	480	749	878	364	546	832	598	949	

Наличие способных к миграции катионов Ca и Mg в почве не известкованного контроля и возрастание их содержания в процессе проведения опыта можно объяснять следующим образом.

При низком уровне агротехники возделывания сельскохозяйственных растений (невысокий уровень применения минеральных удобрений, отказ от использования органических удобрений и от-

сутствие известкования) в почве контрольного варианта начинают формироваться гумусовые вещества с более выраженным кислотным характером [34]. Хорошая аэрация и оптимальные условия для биохимического окисления — необходимые условия для этого процесса. В результате возросшие агрессивность и химическая активность гумусовых кислот усиливают процессы кислотного гидролиза почвенных минералов, перевода в раствор минеральные компоненты. Это приводит к увеличению в почве доступных для вымывания катионов Ca и Mg. В данной связи следует сказать, что за 6 опыто-лет величина pH_{KCl} почвы контрольного варианта снизился с 4.6 до 3.8 ед., т.е. почва перешла из категории среднекислой в категорию очень сильнокислой.

В работе [34] установлено увеличение содержания Ca и Mg в окультуренной дерново-подзолистой песчаной почве, фиксируемое по появлению в составе гумуса фракции гуминовых кислот, связанных с кальцием, спустя 3 года после ослабления антропогенного воздействия. Повышенное содержание Ca и Mg в почве при низком уровне агротехники прослеживали на протяжении 3 лет. Далее элювиальные потери оснований привели к тому, что количество обменных катионов Ca и Mg опять уменьшилось.

В исследованиях [35] возрастание концентрации обменного кальция установлено спустя 10 лет после выведения окультуренной дерново-подзолистой супесчаной почвы из хозяйственного оборота. Повышенная концентрация кальция фиксировалась 7 лет, после чего его содержание снизилось. Повышение концентрации обменного магния наступило только спустя 19 лет после выведения почвы в залежь. На увеличение степени насыщенности и суммы поглощенных оснований в залежной (бывшей окультуренной) почве кустарникового луга есть также указания в работе [36]. Вероятно, подобное явление — закономерный этап развития почв при прекращении или ослаблении антропогенного воздействия и отражает изменения в составе гумуса [37, 38].

В почве мелиорируемых вариантов элювиальные потери Ca и Mg по сравнению с не известкованным контролем возрастали многократно (табл. 3). Максимальная убыль в результате промывания почвы в большинстве вариантов установлена спустя год после известкования. Далее, во всем промежутке времени изучения количество мигрирующих катионов снижалось. С увеличением дозы применения мелиоранта миграционные потери усиливались. Подобная закономерность прослежена в течение всего периода наблюдений. При использовании фракции размером 7–10 мм в эквивалентных с частицами размером 5–7 мм дозах, количество выщелачиваемых

оснований снижалось. Таким образом, степень измельчения доломита оказывала влияние на масштаб миграции кальция и магния.

При известковании частицами размером 5–7 мм в количестве, соответствующем 3 H_T , элювиальные потери оснований спустя 5 опыто-лет начинали превосходить количество вымытых катионов из варианта, мелиорированного ДМ в научно обоснованной дозе, при применении той же фракции, но в дозе 5 H_T , — спустя 4 опыто-года.

Во всем промежутке времени эксперимента элювиальные потери при использовании фракции размером 7–10 мм в дозе 3 H_T были меньше, чем в варианте с ДМ. При применении той же фракции, но в дозе 5 H_T , миграционные потери начинали превосходить количество выщелачиваемых оснований в варианте с ДМ на 6-й опыто-год.

При использовании ЕСМ в научно обоснованной дозе (1 H_T) суммарное количество вымываемых Ca и Mg сравнялось с вариантом, мелиорируемым ДМ только спустя 6 опыто-лет. Начиная со второго срока изучения, миграционные потери Ca и Mg в варианте с ЕСМ в дозе 3 H_T превосходили потери при промывании почвы, известкованной ДМ. Исключение составлял 5-й срок наблюдения, где установлена противоположная закономерность. В целом, при использовании заведомо завышенной дозы доломитовых частиц без разделения на фракции в почве уже в год применения создавался очень значительный, неиспользуемый растениями запас способных к миграции катионов кальция и магния. Последнее обстоятельство заставляет с большой осторожностью рекомендовать для известкования высокие дозы доломитовой крошки без разделения на фракции.

Вне зависимости от варианта опыта и дозы применения доломитовой крошки разной степени измельчения прослежена следующая закономерность. В течение всего периода изучения элювиальные потери оснований после уборки гороха превосходили их потери после уборки горчицы.

В какой-то степени объяснением полученных данных может служить различная потребность гороха и горчицы в кальции и магнии как элементах питания. Считается установленным, что вынос Ca бобовыми растениями (горохом) меняется от 40 до 60 кг/га [39], а представителями семейства капустных (горчица) — 300–500 кг CaO/га [1].

Нельзя также исключить и воздействие корневых выделений выращиваемых культур на скорость растворения частиц доломита, которые могут существенно различаться. Например, в исследованиях [40, 41] показано, что на скорость растворения мелиоранта значительное влияние оказывали даже сортовые особенности корневых

экссудатов яровой пшеницы. Для ответа на этот вопрос нужны специальные исследования.

В большинстве вариантов опыта максимальные потери при миграции пришлись на первое промачивание. В варианте с ДМ количество удаленных катионов за первое промывание составило 60.6% от общей суммы вымытых Ca и Mg за весь срок наблюдений. Далее миграционные потери резко снижались. В вариантах, мелиорированных доломитовой крошкой, выщелачивание металлов при промачивании по срокам носило более плавный характер, что безусловно объясняется разной скоростью растворения частиц неодинакового размера.

В целом известкование приводило к усилению элювиальных потерь оснований в результате промывания. Степень измельчения мелиоранта играла решающую роль в миграционной подвижности катионов. Максимальные потери в результате выщелачивания установлены в варианте с ДМ. По сравнению с вариантом без известкования за 6 опыто-лет эксперимента они усилились в 4.7 раза. Применение ЕСМ в количестве, соответствующем $3 H_r$ и частиц размером 5–7 и 7–10 мм в дозе, равной $5 H_r$, снижало выщелачивание оснований по сравнению с вариантом, мелиорированным ДМ в дозе по $1 H_r$, в 1.3, 1.4 и 1.4 раза соответственно.

По количеству вымытых оснований ($\Sigma Ca + Mg$) из почвы отдельных вариантов опыта за 6 опыто-лет все варианты можно выстроить в следующий по убыванию ряд: ДМ > ЕСМ в дозе $3 H_r$ > фракция размером 5–7 мм в дозе $5 H_r$ > фракция 7–10 мм ($5 H_r$) > фракция 5–7 мм ($3 H_r$) > ЕСМ ($1 H_r$) > фракция 7–10 мм ($3 H_r$) > фракция 5–7 мм ($1 H_r$) > фракция 7–10 мм ($1 H_r$) > контроль.

Установленная закономерность полностью подтверждена при анализе данных миграционной подвижности отдельно кальция и отдельно магния. В зависимости от варианта суммарное количество вымываемого Ca за 6 опыто-лет превосходило количество вымытого Mg в 1.9–3.1 раза.

Следует подчеркнуть, что модельные эксперименты на колонках дали лишь самое общее представление о запасе остающихся в почве после уборки растений и способных к миграции катионов кальция и магния. Это тем более очевидно, если иметь в виду, что промывание в лабораторных исследованиях проводили заведомо избыточным объемом влаги. Более ясное представление о миграционной подвижности щелочноземельных металлов дали данные содержания и распределения обменных катионов Ca и Mg в нарушенном профиле почв. Следует указать, что сведения о скорости перемещения по профилю катионов Ca и Mg противоречивы.

В данной связи показательными являются эксперименты с изотопной меткой ^{45}Ca . В работе [42] изучали динамику сорбции кальция в мелиорированных легкосуглинистых подзолистых почвах. Показано, что миграция ^{45}Ca в почвах происходила в результате процесса диффузии и переноса гравитационным потоком влаги. Максимальная глубина его миграции за первый год в освоенной автоморфной почве составляла 4 см, в глеевой – 5 см. На 2-й год фронт миграции кальция увеличился еще на 1 см. Эти данные свидетельствовали о высокой адсорбционной способности почвенно-поглощающего комплекса, имеющего отрицательный заряд, в отношении двухвалентных про-тивоионов кальция.

Напротив, в опытах [43] кальций меченой извести, внесенной на фоне применения минеральных удобрений перемещался по профилю значительно интенсивней. За 7 мес. эксперимента ^{45}Ca обнаруживали на глубине 37 см в количестве, равном 1.31% от внесенного.

В исследованиях [44] показано, что чем больше была доза минеральных удобрений, тем интенсивнее происходила миграция кальция по почвенному профилю. При поверхностном внесении извести в дерново-подзолистую супесчаную почву через 7 мес. кальций извести мигрировал на глубину 15 см. Спустя 15 мес. после известкования его обнаруживали на глубине 60 см. При применении извести на фоне одинарной дозы минеральных удобрений кальций перемещался на глубину 80 см, в варианте с удвоенной дозой его обнаружили на глубине 110 см.

На содержание и распределение обменных катионов Ca и Mg в профиле дерново-подзолистых почв оказывает влияние и частичная компенсация (возврат) Ca и Mg в корнеобитаемый слой с восходящими потоками влаги. В экспериментах [45], проведенных с дерново-подзолистой почвой на карбонатной морене, занятой коренным лесом, с восходящим движением веществ было компенсировано 29% суммарного количества вымытых Ca и Mg, против 9% в почве с двучленным сложением профиля. В работе [44] показано, что с восходящими токами влаги в зависимости от уровня удобренности и количества использованной извести в пахотный слой поступало от 14.3 до 35.1% CaO и от 22.1 до 34.4% MgO от вымытого количества.

Н.А. Муромцевым с соавт. [46] установлено, что с капиллярным поднятием грунтовых вод в аллювиальную почву возвращалось 77–79% Ca и 25–54% Mg от внесенного количества, в дерново-подзолистую суглинистую глубокооуглееную почву – 5.2–7.5% Ca и 4.7–7.1% Mg.

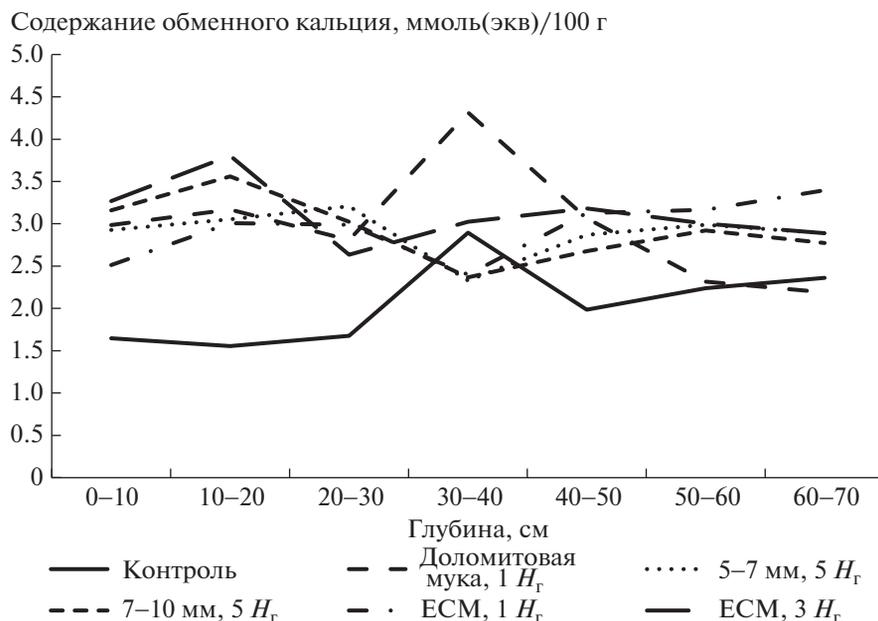


Рис. 1. Содержание и распределение обменного кальция, ммоль(экв)/100 г почвы.

Таким образом, возврат оснований в корнеобитаемый слой в результате капиллярного поднятия влаги может оказать определенное влияние на содержание и распределение щелочноземельных металлов в профиле почвы.

Данные содержания и распределения обменного Са в профиле почвы представлены на рис. 1. В почве неизвесткованного контроля содержание обменного кальция в слое 0–30 см менялось незначительно (1.56–1.68 ммоль(экв)/100 г почвы). В более глубоких слоях профиля концентрация Са была больше, ее величина не опускалась ниже 2 ммоль(экв)/100 г почвы.

Использование ДМ привело к обогащению кальцием слоя 0–40 см почвы. Распределение по слоям носило выровненный характер, а содержание менялось от 2.55 до 2.95 ммоль(экв)/100 г почвы. С глубины 40 см концентрация кальция снижалась.

Использование доломитовой крошки размером 5–7 см в количестве 5 H_r также способствовало росту содержания обменного кальция по всему профилю. При этом в большинстве исследованных слоев его концентрация превосходила содержание в почве варианта, мелиорированного ДМ.

Применение доломитовых частиц размером 7–10 мм, в 5 раз превышающим научно обоснованную дозу, также привело к росту концентрации обменного кальция во всех слоях профиля по сравнению с почвой неизвесткованного контроля. В большинстве исследованных слоев его концентрация превосходила содержание в почве ва-

рианта с ДМ и варианта с фракцией размером 5–7 мм. Очевидно, различия в содержании обменного кальция в профиле почвы, известкованной различными по размеру частицами доломита, объясняются неодинаковой скоростью растворения различных по размеру частиц доломита. Например, в работе [21] показано, что спустя год после известкования в почве, мелиорированной ДМ в научно обоснованной дозе, прореагировало 85% от внесенного количества. При использовании частиц доломита размером 1–3 мм растворилось 31% от внесенного количества. Вероятно, за 6 опыто-лет эксперимента нижние слои профиля почвы, известкованной ДМ, оказались в значительной степени “отмыты” от подвижных соединений кальция.

Максимальное накопление обменного кальция зафиксировано в варианте с известкованием ЕСМ в дозе 3 H_r . В слое 10–20 см его содержание составило 3.81 ммоль(экв)/100 г почвы. При снижении дозы до 1 H_r эффект от применения оказался меньше (3.0 ммоль(экв)/100 г почвы). Содержание обменного кальция до глубины 30–40 см в варианте с использованием ЕСМ в дозе 1 H_r не уступало содержанию обменного кальция в том же слое почвы, мелиорированной ДМ в дозе по 1 H_r . В целом, вне зависимости от дозы применения и размера частиц мелиоранта известкование привело к обогащению почвенного профиля обменным кальцием. Таким образом, в процессе нахождения в почве крупные частицы доломита постепенно растворяясь, пополняли запас доступного для растений кальция.

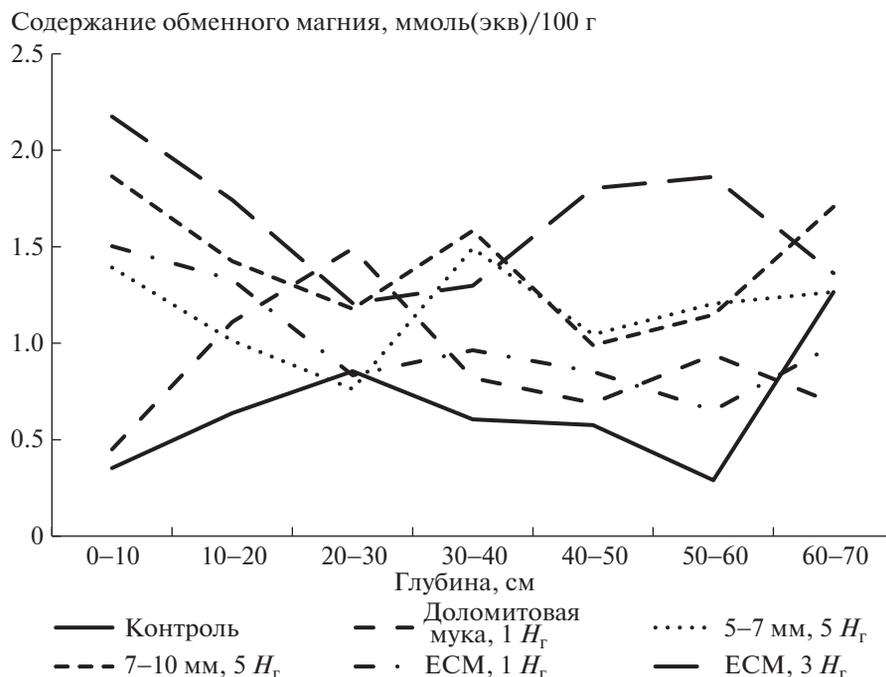


Рис. 2. Содержание и распределение обменного магния, ммоль(экв)/100 г почвы.

Данные содержания и распределения Mg в профиле приведены на рис. 2. Следует констатировать крайне низкое содержание обменного Mg в культивируемом слое почвы контрольного варианта, что характерно для слабокультуренных почв легкого гранулометрического состава.

В настоящее время в связи с прекращением поставок сельскому хозяйству магнийсодержащих удобрений и мелиорантов, баланс этого элемента стал отрицательным. Площадь почв, нуждающихся в первоочередном внесении Mg, в РФ составляет ≈ 7 млн га [47].

В слое 0–10 см почвы не известкованного контроля содержание Mg составило всего 0.35 ммоль(экв)/100 г почвы. На глубине 50–60 см концентрация этого элемента снизилась до 0.29 ммоль(экв)/100 г почвы. В слое 60–70 см содержание Mg достигало своего максимума (1.27 ммоль(экв)/100 г почвы). В работе [48] показано, что при содержании $MgO < 40$ мг MgO/kg почвы за 4–6 лет возделывания сельскохозяйственных культур запас подвижных соединений этого элемента в почвах может быть полностью исчерпан. Данные настоящего исследования показали, что без пополнения запасов этого элемента в почве не известкованного контроля возделывание сельскохозяйственных культур в самое ближайшее время станет невозможным.

В варианте с применением ДМ наиболее обогащенным оказался слой 20–30 см (1.5 ммоль(экв)/100 г почвы). В нижележащих

слоях концентрация Mg снижалась. С глубины 40 см распределение Mg по профилю носило выровненный характер.

Вне зависимости от дозы применения и размера частиц мелиоранта известкование доломитовой крошкой способствовало обогащению профиля почвы обменным Mg. Характер распределения этого элемента по профилю почвы, известкованной доломитовыми частицами, существенно отличался от почвы, мелиорированной ДМ. Вне зависимости от варианта опыта, максимальное его содержание было характерно для самого верхнего слоя (0–10 см) почвы. Наибольшим накоплением характеризовался 0–10 сантиметровый слой почвы варианта, произвесткованного ЕСМ в количестве 3 H_r . В почве вариантов, мелиорированных частицами размером 5–7 и 7–10 мм, внесенных в дозе 5 H_r , концентрация Mg в слое 0–10 см была меньше.

Размер частиц мелиоранта также повлиял на содержание обменного Mg в почве известкованных вариантов. Чем крупнее частицы доломита, тем более обогащенным Mg оказался слой почвы 0–10 см. По-видимому, это было связано с различной скоростью растворения доломитовых частиц размером 5–7 и 7–10 мм и, как следствие, различной интенсивностью миграции Mg из почвы вариантов, мелиорированных этими фракциями.

В известкованной доломитом почве распределение Mg по профилю подчинялось следующей

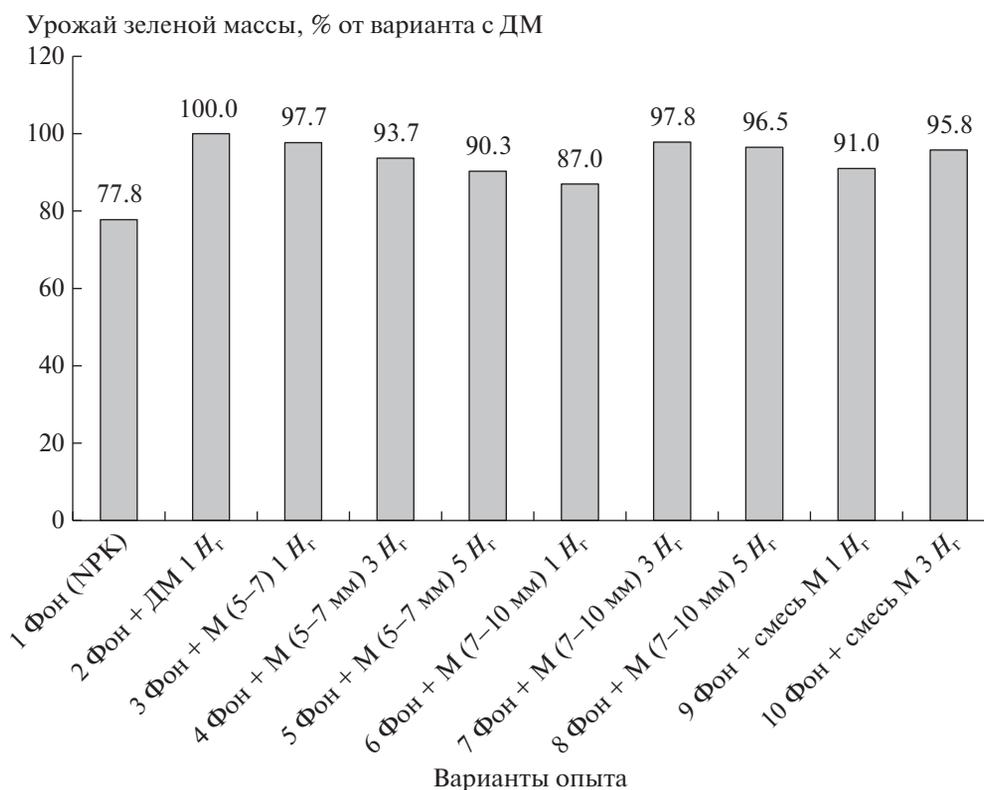


Рис. 3. Урожай зеленой массы растений за 6 опыто-лет эксперимента.

закономерности. На глубине 20–30 см концентрация Mg снижалась. Далее, вниз по профилю, она возрастала, но, как правило, не достигала показателей, установленных в слое 0–10 см. Исключение составляла почва варианта, мелиорированного фракцией размером 5–7 мм в дозе 5 Н_т. В данном случае концентрация Mg на глубине 30–40 см превосходила концентрацию, установленную в слое 0–10 см. В целом, вне зависимости от варианта опыта известкование способствовало росту концентрации обменного Mg по всему почвенному профилю мелиорированной почвы.

Считается установленным, что для требовательных к кальцию культур необходимое суммарное содержание Ca и Mg в легко- и среднесуглинистых почвах должно составлять не менее 4–6 ммоль (экв)/100 г почвы [1]. Проведенное исследование показало, что использование высоких доз крупных по размеру частиц доломитовой крошки привело к обогащению культивируемого слоя обменными (доступными для растений) соединениями Ca и Mg. Суммарное количество обменных катионов в культивируемом слое, вне зависимости от варианта опыта не опускалось меньше 4 ммоль(экв)/100 г почвы.

Следует подчеркнуть, что после 6-ти опыто-лет эксперимента в пахотном слое продолжало

оставаться значительным количество неразложившихся частиц мелиоранта, наличие которых легко устанавливали визуально. Очевидно, в процессе дальнейшего взаимодействия с почвой гранулы доломита, постепенно растворяясь, будут способствовать обогащению почвы доступными для растений катионами Ca и Mg. Это позволило рассматривать использование высоких доз крупных фракций доломитовой крошки в качестве мелиоративного приема, направленного на устранение почвенной кислотности и обогащение почвы обменными катионами Ca и Mg в длительном последствии.

На рис. 3 приведены данные урожайности зеленой массы растений за 6 опыто-лет эксперимента. Результаты свидетельствуют, что максимальной продуктивностью характеризовалась почва, произвесткованная доломитовой мукой. Выход зеленой массы растений в контрольных сосудах составил 78% от варианта, мелиорированного доломитовой мукой. Урожайность в остальных вариантах менялась от 87.0 до 97.7% от варианта, мелиорированного доломитовой мукой.

Таким образом, положительное влияние крупных частиц доломита, использованного в качестве известкового материала, установлено во всех вариантах изученных почв.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в почве после уборки растений сохранялся определенный запас водорастворимых катионов кальция и магния. Чем выше была доза применения крупных частиц доломита, тем этот запас больше. Угрозы роста непродуцибельных потерь кальция и магния при использовании высоких доз крупных фракций доломита по сравнению с применением доломитовой муки (ДМ) в научно обоснованной дозе не установлено. Применение естественной смеси мелиоранта в заведомо завышенной дозе вызывало определенные опасения из-за высоких потерь оснований при выщелачивании.

В почве мелиорированных вариантов элювиальные потери кальция и магния по сравнению с неизвесткованным контролем возрастали многократно. С увеличением дозы применения мелиоранта потери при миграции также усиливались. На масштабы миграции катионов оказывала влияние степень измельчения мелиоранта. В течение всего периода эксперимента после уборки гороха запас способных к миграции катионов кальция и магния вне зависимости от варианта опыта превосходил запас этих элементов, остающихся в почве после уборки горчицы. По количеству вымытых из почвы опыта за 6 опыто-лет оснований, как суммы кальция и магния, так и кальция и магния отдельно, все варианты выстраивались в следующий по убыванию ряд: ДМ > ЕСМ в дозе 3 H_r > фракция размером 5–7 мм в дозе 5 H_r > фракция 7–10 мм (5 H_r) > фракция 5–7 мм (3 H_r) > ЕСМ (1 H_r) > фракция 7–10 мм (3 H_r) > фракция 5–7 мм (1 H_r) > фракция 7–10 мм (1 H_r) > контроль. Суммарное количество вымытого кальция, в зависимости от варианта опыта, превосходило количество вымытого магния в 1.9–3.1 раза. Известкование доломитом вне зависимости от дозы применения и размера частиц привело к обогащению почвенного профиля обменными катионами кальция и магния. Проведенное исследование открывает возможность использования частиц размером 5–7 и 7–10 мм в заведомо завышенных дозах в качестве мелиоранта пролонгированного действия. Положительное влияние крупных частиц доломита, использованного в качестве известкового материала, установлено во всех изученных вариантах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Небольсин А.Н., Небольсина З.П. Известкование почв. Результаты 50-летних полевых опытов. СПб., 2010. 253 с.
2. Литвинович А.В., Небольсина З.П. Продолжительность действия мелиорантов в почвах и эффектив-

ность известкования // *Агрохимия*. 2012. № 10. С. 79–94.

3. Шильников И.А., Лебедева Л.А. Известкование почв. М.: Агропромиздат, 1987. 179 с.
4. Яковлева Л.В. Миграция оснований в дерново-подзолистых почвах Северо-Запада России. СПб., 2013. 105 с.
5. Аканова Н.И., Шильников И.А., Ефремова С.Ю., Аваков М.С. Значение химической мелиорации в земледелии и потери Ca и Mg из почвы // *Пробл. агрохим. и экол.* 2017. № 1. С. 28–35.
6. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Содержание и распределение свинца в зоне действия завода туковой промышленности // *Агрохимия*. 1996. № 3. С. 92–100.
7. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Содержание и особенности распределения валовых и кислоторастворимых форм соединений тяжелых металлов в профиле сероземно-оазисных почв в зоне химического завода // *Агрохимия*. 1999. № 8. С. 68–78.
8. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Осипов А.И. Содержание и запасы серы в техногенно-загрязненных почвах // *Агрохимия*. 1998. № 12. С. 64–70.
9. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В. Миграция фтора в почвах различных природно-климатических областей // *Агрохимия*. 1998. № 6. С. 74–81.
10. Litvinovich A., Pavlova O., Lavrishchev A., Bure V., Saljnikov E. Migration behaviour of fluoride in contaminated soils near ammophos production plant: laboratory studies // *Biol. Commun.* 2019. Т. 64. № 4. С. 270–278.
11. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В. О вымывании кальция и стронция из дерново-подзолистой супесчаной почвы, произвесткованной конверсионным мелом // *Агрохимия*. 1999. № 9. С. 64–67.
12. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Юзмухаметов Д.Н., Лаврищев А.В. Миграционная способность стабильного стронция в дерново-подзолистых почвах Северо-Запада России (по данным модельных опытов) // *Почвоведение*. 2008. № 5. С. 568–575.
13. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю. Интенсивность миграции кальция из дерново-подзолистой супесчаной почвы, произвесткованной различными дозами мелиоранта (по данным модельного опыта) // *Агрохимия*. 2015. № 6. С. 84–89.
14. Павлова О.Ю., Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Шевченко Е.Е., Салаев И.В., Белимов А.А. Изучение почвенных растворов, вымываемых из мелиорированных дерново-подзолистых почв // *Агрохимия*. 2018. № 12. С. 69–76.
15. Павлова О.Ю., Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М. Миграционная подвижность фтора при мелиорации кислых почв фторсодержащими отходами промышленности // *Агрофизика*. 2019. № 3. С. 20–25.
16. Литвинович А.В., Бакина Л.Г., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В. Устойчивость органического вещества и кальция известкованной почвы к вымывающему действию воды // *Агрохимия*. 2017. № 3. С. 58–68.

17. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Маслова А.И., Чернов Д.В. Калийное состояние дерново-подзолистой глееватой песчаной почвы при окультуривании и под залежью // Почвоведение. 2006. № 7. С. 876–882.
18. Литвинович А.В., Дричко В.Ф., Павлова О.Ю. Оценка параметров функции удержания кальция и стронция дерново-подзолистой супесчаной почвой при мелиорации конверсионным мелом (по данным модельного опыта) // Современные проблемы опытного дела: Мат-лы Международ. науч.-практ. конф. СПб., 2000. С. 204–210.
19. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М. Потери Ca, Mg, K, Na, Fe и F из орошаемой лугово-сероземной почвы в результате миграции. Эмпирические модели процесса элювирования (по данным лабораторного опыта) // Агрохимия. 2020. № 1. С. 58–69.
20. 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.
21. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М., Ковлева А.О. Мелиоративные свойства, удобрительная ценность и скорость растворения в почвах различных по размеру фракций отсева доломита, используемого для дорожного строительства // Агрохимия. 2016. № 2. С. 31–41.
22. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В. Скорость растворения в почвах мелиорантов карбонатной природы (эмпирические модели динамики растворения) // Агрохимия. 2016. № 12. С. 42–50.
23. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О. Динамика содержания обменных катионов кальция и магния в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорированной различными по размеру фракциями доломита (эмпирические модели процесса подкисления) // Агрохимия. 2018. № 3. С. 50–61.
24. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О. Влияние разных по размеру фракций доломита на показатели почвенной кислотности легкосуглинистой дерново-подзолистой почвы (эмпирические модели процесса подкисления) // Агрохимия. 2017. № 12. С. 27–37.
25. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О. Изучение динамики содержания подвижного железа в легкосуглинистой дерново-подзолистой почве, мелиорированной доломитом // Агрохимия. 2019. № 3. С. 52–61.
26. Литвинович А.В., Лаврищев А.В., Буре В.М., Павлова О.Ю., Ковлева А.О., Хомяков Ю.В. Динамика содержания подвижного марганца в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, мелиорированной различными по размеру фракциями доломита // Агрохимия. 2018. № 8. С. 52–63.
27. Салаев И.В., Литвинович А.В., Шевченко Е.Е. Влияние крупных фракций отсева щебеночного производства на содержание гумуса в дерново-подзолистой суглинистой почве, урожай и химический состав растений гороха // Агрофизика. 2016. № 3. С. 7–14.
28. Шевченко Е.Е., Литвинович А.В., Макаренко В.В. Влияние возрастающих доз крупных фракций отсева доломита на общее содержание и водорастворимые формы гумуса мелиорированной дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы // Агрофизика. 2017. № 4. С. 25–37.
29. Лешко Т.Л., Литвинович А.В., Манаков П.С., Тябин А.О. Изменение структурного состояния дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы (umbric albeluvisols abruptic) при известковании крупными частицами доломитовой крошки // Агрофизика. 2019. № 1. С. 15–25.
30. Шевченко Е.Е. Изменение общего содержания гумуса за 5 опытно-лет при использовании отсева щебеночного производства // Гумус и почвообразование. СПб.–Пушкин, 2017. С. 83–87.
31. Шедеров С.Г., Воробьева В.А., Цветкова Ю.Н. Действие известняковой муки на почву и растения в зависимости от ее гранулометрического состава. Варшава, 1970. С. 104–114.
32. Лаврищев А.В., Литвинович А.В. Стабильный стронций в агроэкосистемах. СПб.–Краснодар–М., 2019. 192 с.
33. ГОСТ 26487-85 Почвы. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния методами ЦИНАО (с поправкой). М., 1986.
34. Орлова Н.Е., Бакина Л.Г. Современные процессы гумусообразования в окультуренных дерново-подзолистых почвах Северо-Запада России // Агрохимия. 2002. № 11. С. 5–12.
35. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Дричко В.Ф., Чернов Д.В., Фомина А.С. Изменение кислотно-основных свойств окультуренной дерново-подзолистой песчаной почвы в зависимости от срока нахождения в залежи // Почвоведение. 2005. № 10. С. 1232–1239.
36. Сушков С.Ф. Динамика почвенно-растительного покрова на залежных землях (на примере юго-западных районов Ленинградской области): Автореф. дис. ... канд. географ. наук. Л., 1974. 25 с.
37. Литвинович А.В., Дричко В.Ф., Павлова О.Ю., Чернов Д.В., Шабанов М.В. Изменение кислотно-основных свойств окультуренных дерново-подзолистых почв легкого гранулометрического состава в процессе постагрогенной трансформации // Почвоведение. 2009. № 6. С. 680–686.
38. Литвинович А.В., Павлова О.Ю. Трансформация состава гумуса дерново-подзолистых почв легкого гранулометрического состава под действием возрастающих доз извести и в постагрогенный период // Почвоведение. 2010. № 11. С. 1362–1369.
39. Корнилов М.Ф., Небольсин А.Н., Семенов В.А. Известкование кислых почв Нечерноземной полосы СССР. Л.: Колос, 1971. 256 с.
40. Литвинович А.В., Ковлева А.О., Павлова О.Ю. Влияние известкования на накопление марганца и железа растениями яровой пшеницы // Агрохимия. 2015. № 5. С. 61–68.
41. Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М., Салаев И.В. Скорость растворения в поч-

- вах мелиорантов карбонатной природы (эмпирические модели динамики растворения) // *Агрохимия*. 2016. № 12. С. 42–50.
42. *Платонов И.Г.* Динамика сорбции и миграция кальция в подзолистых легкосуглинистых почвах // *Вопросы известкования почв*. М.: Агроконсалт, 2002. С. 101–106.
43. *Рясинская Л.М.* Влияние известкования на основные физико-химические свойства лугово-бурых оподзоленных почв: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. Владивосток, 1973. 20 с.
44. *Мазур Г.А., Симачинский В.Н., Дмитренко П.А., Томашевская Е.Г.* Миграция и характер превращения кальция извести в дерново-подзолистых почвах // *Почвоведение*. 1980. № 3. С. 34–41.
45. *Кауричев И.С., Яшин И.М., Кашанский А.Д., Каценко В.С.* Опыт применения сорбционных лизиметров при изучении водной миграции веществ в подзолистых почвах европейского Севера // *Почвоведение*. 1986. № 8. С. 29–41.
46. *Муромцев Н.А., Семенов Н.А.* Потери и возврат химических веществ в почвах при инфильтрации и подпитывании грунтовыми водами // *Почвоведение*. 2005. № 4. С. 457–463.
47. *Зеленов Н.А., Шильников И.А., Аканова Н.И., Швырков Д.А.* Резерв химических мелиорантов и их агроэкологическая эффективность // *Современные проблемы и перспективы известкования кислых почв*. Мат-лы научн. конф., посвящ. 75-летию со дня рождения д-ра с.-х. наук, проф. А.Н. Небольсина. СПб., 2010. С. 30–34.
48. *Шильников И.А., Аканова Н.И., Баринев В.Н.* Прогноз изменения кислотности почв и содержания Ca и Mg в земледелии Нечерноземья // *Вопросы известкования почв*. М.: Агроконсалт, 2002. С. 221–232.

Content and Distribution of Exchange Cations Ca and Mg in the Profile of Sod-Podzolic Light Loamy Soil Reclaimed by Increasing Doses of Large-Sized Dolomite Particles

A. V. Litvinovich^{a, #}, I. V. Salaev^a, P. S. Manakov^a, O. Yu. Pavlova^a, and A. V. Lavrishchev^b

^a*Agrophysical Research Institut
e Grazhdansky prosp. 14, Saint-Petersburg 195220, Russia*

^b*Sankt-Petersburg State Agrarian University
Peterburgskoe shosse 2, Saint-Petersburg—Pushkin 196601, Russia*

[#]*E-mail: av.lavrishchev@yandex.ru*

In a long-term 10-variant field experiment and in a series of laboratory experiments, the migration mobility of calcium and magnesium in sod-podzolic light loamy soil reclaimed by large-sized particles of dolomite chips was studied. It was found that large-sized dolomite particles were not “ballast”. When they got into the soil, they gradually dissolved. Every year, after harvesting, a certain reserve of mobile Ca and Mg cations remains in the soil reclaimed by dolomite particles of 5–7 and 7–10 mm in size. The higher the dose of application and the smaller the size of the dolomite particles, the greater this margin. In experiments on columns, it was shown that the stock of Ca and Mg cations capable of migration in soil reclaimed by dolomite particles of 5–7 and 7–10 mm, in an amount corresponding to 3 and 5 total doses calculated from hydrolytic acidity (H_a), for 6 experimental years was inferior to the amount of Ca and Mg migrating from soil limed with dolomite flour (DF) in a scientifically justified dose ($1 H_a$). This opens up the possibility of safe use of large fractions of dolomite chips in deliberately inflated doses as a long-acting meliorant. The use of screening without separation into fractions at a dose of $3 H_a$ caused some concerns due to high unproductive losses of calcium and magnesium with seeping moisture of atmospheric precipitation and needed additional study. The individual variants of the experiment were ranked according to the amount of alkaline earth metals removed from the soil during washing. It was found that the migration mobility of calcium, depending on the variant of the experiment, exceeded the amount of washed magnesium by 1.9–3.1 times. The curves of the content and distribution of alkaline earth metals in individual horizons of undisturbed soil profile reclaimed by high doses of dolomite crumb particles of various sizes are presented. The positive effect of large particles of dolomite used as a lime material on the yield of plants was established in all the studied variants.

Key words: reclamation, screening of crushed stone production, soil, migration, alkaline earth metals, model experience.

УДК 543.429.23:631.417.2

ЯМР-СПЕКТРОСКОПИЯ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ ПОЧВ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ПОНИЖЕНИЙ И БУГРОВ ПУЧЕНИЯ¹

© 2021 г. Е. Ю. Мильхеев^{1,*}, Ю. Б. Цыбенков¹

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

*E-mail: evg-milh@rambler.ru

Поступила в редакцию 25.09.2020 г.

После доработки 19.11.2020 г.

Принята к публикации 11.01.2021 г.

Биоклиматические условия почвообразования в зоне криоаридного климата Забайкалья определяют специфический состав гуминовых веществ (ГВ), однако гетерогенность этих соединений, а также широко используемые классические методы анализа органического вещества не позволяют с достаточной степенью уверенности судить о структуре высокомолекулярных органических соединений в почвах криолитозоны. Спектроскопия ¹³С-ЯМР препаратов гуминовых кислот (ГК) исследованных почв (криоморфозов) позволила выделить диапазоны химических сдвигов, принадлежащих атомам углерода различных функциональных групп и молекулярных фрагментов. Сравнительный анализ молекулярного состава ГК исследованных почв показал, что при переходе от бугров пучений к термокарстовым понижениям происходит трансформация структурно-функциональных параметров гуминовых кислот, которая выражается в уменьшении доли ароматических фрагментов и увеличении лабильных углеводных, аминокислотных и метоксильных остатков. Возрастание доли алифатических структур и снижение доли ароматических фрагментов в составе препаратов ГК позволяют говорить об упрощении строения молекулы гуминовой кислоты, что может быть обусловлено снижением микробиологической активности в термокарстовом понижении в условиях их постоянного переувлажнения.

Ключевые слова: гуминовые вещества, гуминовые кислоты, ЯМР-спектроскопия, бугры пучения, термокарстовые понижения.

DOI: 10.31857/S0002188121040098

ВВЕДЕНИЕ

Судьба природного органического вещества и особенно гуминовых веществ (ГВ) в последние десятилетия привлекает все больший интерес ученых, представляющих различные дисциплины. ГВ, являясь важнейшим компонентом почвенного гумуса, характеризуется нестехиометричностью состава, нерегулярностью строения, полидисперсностью и гетерогенностью структурных элементов. Гетерогенная химическая природа ГВ играет многофункциональную роль в окружающей среде, контролируя биогеохимический цикл углерода, обеспечивая растения питательными веществами и биостимуляторами роста и взаимодействуя с неорганическими и органическими загрязнителями.

Компонентный состав органического вещества почв – динамический показатель, отражаю-

щий влияние экологических условий на геохимический цикл углерода экосистемы. Основными механизмами стабилизации биомолекул органических остатков в аэробных условиях являются гумификация и органо-минеральные взаимодействия [1]. В силу исторически сложившихся традиций в основу классификации ГВ положено их различие, связанное с извлечением этих специфических соединений из природных объектов теми или иными растворителями. По общепринятой классификации гуминовые вещества делят на гуминовые кислоты (ГК) (растворимы в щелочных растворах), фульвокислоты (ФК) (растворимы во всем диапазоне pH) и гумины (нерастворимы во всем диапазоне pH).

Гуминовые кислоты – природные высокомолекулярные системы нерегулярного строения, являются одним из главных компонентов органического вещества почв, торфов, природных вод, морских и озерных донных отложений. Они накапливают элементы минерального питания,

¹ Работа выполнена в рамках проекта НИР 0271-2021-0004 (FWSM-2021-0004).

обеспечивая их постепенное поступление в живые организмы, отвечают за структурообразование почв и их благоприятные водно-физические свойства, снижают негативное действие токсичных веществ [1]. Существовая в почвах тысячи лет, ГК придают им стабильность, своеобразную буферность, определенный биохимический фон [2].

В настоящее время специалистов в области химии природного органического сырья привлекают уникальные возможности спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР) ^{13}C для количественного анализа и изучения строения многокомпонентных систем, в том числе и гуминовых кислот [3]. Применимость данного метода исследования в изучении функционального состава ГК подтверждена неоднократно [3–5]. Использование сверхпроводящих магнитов и преобразования Фурье позволило не только разделять сигналы при высоком уровне шумов или при их наложении, но и выполнять расчет интегральной интенсивности сигналов [6, 7].

Комплексное изучение высокомолекулярных органических соединений криогенных форм рельефа (бугров пучений и термокарстовых понижений), сформированных в условиях ультраконтинентального климата Бурятии и относительно близко залегающих многолетнемерзлых пород, с использованием высокочувствительных спектроскопических методов будет способствовать пониманию фундаментальных процессов гумусообразования и созданию новых представлений о сложных по составу и структуре природных высокомолекулярных соединений почв в зоне криогенеза.

Цель работы – изучение химического строения гуминовых кислот почв термокарстовых понижений и бугров с использованием ^{13}C ядерного магнитного резонанса. Выявление структурных особенностей ГК криоморфозов по ^{13}C -ЯМР-спектрам позволяет установить закономерности изменения структурного состава гуминовых кислот почв различного криогенеза.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Район исследования расположен в Еравнинской котловине юга Витимского плоскогорья, где многолетняя мерзлота достигает максимальной мощности 120–130 м, в среднем составляя 80–85 м [8, 9]. Верхняя границы мерзлоты залегает на глубине 1.5–3.0 м от дневной поверхности, местами – на глубине <1 м.

Объектами исследования послужили образцы ГК, полученные из верхних генетических горизонтов почв бугров пучения и термокарстовых

понижений. Гуминовые кислоты были выделены по стандартной методике [10] экстракцией 0.1 н. NaOH, препараты ГК очищали путем переосаждения 20%-ным раствором HCl до величины pH 1.5–2.0 и многократного центрифугирования. Осадок промывали 0.1 н. HCl, затем дистиллированной водой, высушивали и растирали до состояния пудры. Спектры ядерно-магнитного резонанса ^{13}C -ЯМР были сняты на спектрометре Avance 300 MHz “Вукер” (Германия) с рабочей частотой 100.53 МГц с использованием твердофазной методики CP-MAS. Частота вращения образца 6 kHz, время контакта 5 мс, время релаксации 5 с, количество накоплений 3500–13000 сканов. Химические сдвиги представлены относительно тетраметилсилана со сдвигом 0 ppm, в качестве стандарта использовали пик адамантана (в слабом поле) при 38.48 ppm. Для количественной обработки применяли численное интегрирование по областям, соответствующим расположению функциональных групп и молекулярных фрагментов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для изучения особенностей структурно-функциональных параметров органического вещества почв бугров и понижений были сняты ^{13}C -ЯМР-спектры (техника CP-MAS) препаратов гуминовых кислот. Все полученные спектры ГК характеризовались широкими полосами поглощения, обусловленными перекрыванием нескольких сигналов (рис. 1).

Ввиду сильного перекрывания пиков, отнесение сигналов в твердофазных ^{13}C -ЯМР-спектрах возможно только по диапазонам химического сдвига, согласно положению резонансов атомов со сходным химическим окружением (табл. 1).

По характеру спектров ЯМР ^{13}C видно, что в химическом строении углеродного скелета ГК бугров и понижений в сопоставимых количествах содержатся как ароматические, так и алифатические компоненты. Относительно острый пик, сосредоточенный в области 30 м.д., может быть отнесен к метиленовым атомам углерода в положениях α , β , δ и ϵ от концевых метильных групп (15 м.д.) в алкильных цепочках [11]. Эти метиленовые атомы углерода, как предполагается некоторыми исследователями, могут являться результатом накопления воскоsmол, липидов и субербиновых структур из растений [12–15].

Также все спектры имели сигнал в диапазоне 47–60 м.д., который некоторые авторы связывают с метоксильными группами, обусловленными

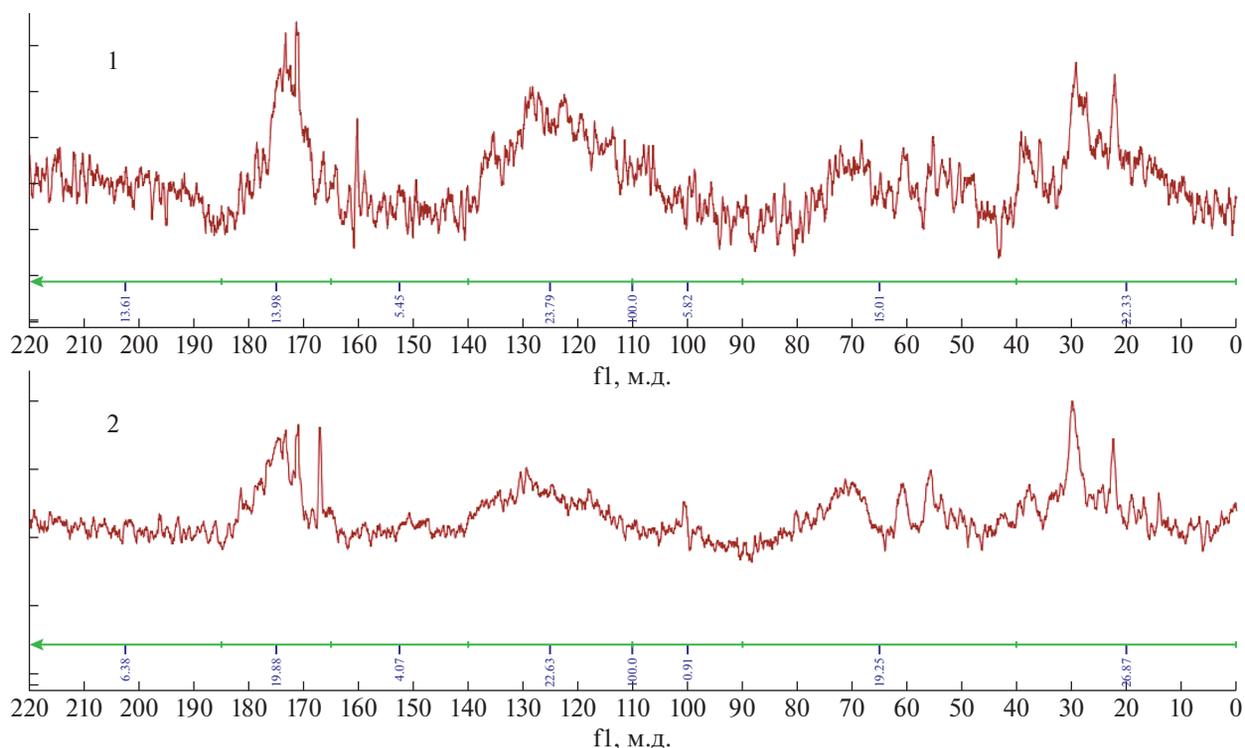


Рис. 1. Спектры ^{13}C -ЯМР гуминовых кислот: 1 – бугор пучения, 2 – термокарстовое понижение.

присутствием лигниновых фрагментов – синрингил- и гваяцилпропановых единиц [16, 17]. Однако в этой области химических сдвигов можно также наблюдать и сигналы от атомов углерода в α положении в полипептидах ($-\text{C}(\text{O})-\text{C}^*(\text{R})\text{N}-\text{NH}-$)_n [14, 18]. Высокий коэффициент корреляции между интенсивностью сигнала в диапазоне 47–60 м.д. и массовой долей азота в составе исследованных гуминовых веществ косвенно подтверждал последнее предположение. Количественная оценка их ядерных сигналов показала, что содержание $\text{C}_{\text{лигн}}$ в препаратах, выделенных из бугра, больше, чем в понижении. На состав ГК,

возможно, повлияла высокая лигнинофицированность первичных источников гумуса, различия в видовом составе травянистой растительности.

Интенсивный пик при 71 м.д. в ^{13}C -ЯМР-спектрах характерен для $\text{CH}(\text{O})$ -групп кольцевых атомов углерода в углеводах [11]. Сигнал в этой области спектра распространяется от 64 до 90 м.д., который, вероятно, происходит от различных $\text{HC}-\text{OH}$ -групп целлюлозных или других углеводных фрагментов [14]. Слабый сигнал ≈ 62 м.д. типичен для CH_2O -групп гексоз из полисахаридных фрагментов [19]. Наличие слабо интенсивного сигнала при 101 м.д., который является

Таблица 1. Содержание молекулярных фрагментов гуминовых кислот

Химический сдвиг, м.д.	Тип молекулярных фрагментов*	Интегральная интенсивность, %	
		бугор пучения	термокарстовое понижение
0–40	$\text{C}_{\text{алк}}$	22.3	26.9
40–90	$\text{C}_{\text{алк}}-\text{O}$	15.0	19.3
90–110	$\text{C}_{\text{ар}}$	5.8	0.9
110–140	$\text{C}_{\text{ар}}-\text{CH}$	23.8	22.6
140–165	$\text{C}_{\text{ар}}-\text{O}$	5.5	4.1
165–185	$\text{C}_{\text{COOH}} + \text{C}_{\text{COOR}}$	14.0	19.9
185–220	$\text{C}_{\text{C=O}}$	13.6	6.4

*Ковалевский Д.В. Исследование структуры гумусовых кислот методами спектроскопии ЯМР ^1H и ^{13}C : Дис. ... канд. хим. наук. М., 1998. 140 с.

представительным для аномерных (полуацетальных) атомов углерода, также подтверждал присутствие углеводных фрагментов в структуре ГК.

В области ароматических фрагментов сигнал в пределах 90–165 м.д. могут давать незамещенные и/или алкил-замещенные ароматические атомы углерода. Пик при 147–149 м.д. типичен в спектрах структурных блоков лигнина, и его приписывают к кислородзамещенным атомам углерода ароматических колец – синрингил- и гваяцилпропановых единиц [14, 20]. ЯМР-спектры ГК бугра пучения имели более интенсивные сигналы в этой области по сравнению с термокарстовым понижением.

Многие свойства ГК определяются типом и количеством функциональных групп в их составе. В области карбоксильной группы (165–185 м.д.) наблюдали максимум при 171–173 м.д., в значительной степени относимый к углероду карбоксильных групп [21], но также он может принадлежать и карбонильной группе амидов и полипептидов [14]. Преобладание карбоксильных групп (–СООН) служит основанием для причисления гуминовых веществ к кислотам, в частности к высокомолекулярным ароматическим оксикарбоновым кислотам. Атомы углерода хинонных фрагментов и карбонильных групп альдегидов и кетонов вносили свой вклад в слабые сигналы в области 185–220 м.д., и невысокое их содержание (6.4–13.6), вероятно, связано с понижением биохимической активности почв понижений.

Кроме рассмотренных соотношений важным свойством ГК является соотношение в их составе гидрофильных и гидрофобных компонентов. К гидрофильным компонентам относимые функциональные кислородсодержащие группы (С=О, СООН, С_{алк-О}-фрагменты), а гидрофобную часть представляют С- и Н-замещенные ароматические и алкильные фрагменты (С_{ар}СН и С_{алк}) гуминовых кислот. Доля гидрофильных фрагментов в исследованных препаратах, которая отвечает за реакционную способность ГК, составляла 42.6–45.6%.

Сравнительный анализ молекулярного состава ГК исследованных почв показал, что при переходе от бугров пучений к термокарстовым понижениям происходила трансформация структурно-функциональных параметров гумусовых кислот, которая выражалась в уменьшении доли ароматических фрагментов и увеличении лабильных углеводных, аминокислотных и метоксильных остатков. Основными факторами, влияющими на строение и свойства высокомолекулярных органических соединений почв, являются климатические условия (температурный и водный режимы) обуславливающие специфику растительности и микробиоло-

гической активности исследованных криогенных экосистем.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что избыточное увлажнение заметно влияет не только на количество накапливаемых гумусовых соединений, но и оказывает воздействие на их молекулярную структуру, а именно, обуславливает накопление в полугидроморфных почвах гумусовых веществ, обогащенных алифатическими цепочками. Переувлажнение, в совокупности с анаэробными условиями и низкой микробиологической активностью заметно снижает скорость трансформации почвенного органического вещества и приводит к увеличению доли не окисленных алифатических фрагментов в структуре гуминовых кислот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в спектрах ¹³С-ЯМР гуминовых кислот (ГК) бугров пучений доминирует сигнал углерода ароматического ряда, в ГК термокарстовых понижений – алифатического. Эти данные полностью совпадают с результатами элементного состава, величинами отношения Н : С. Выявленные различия в содержании атомов углерода, входящих в состав структурных фрагментов в составе макромолекул ГК, свидетельствуют о разных условиях почвообразования и гумификации. Возрастание доли алифатических структур и снижение доли ароматических фрагментов в составе препаратов ГК позволяют говорить об упрощении строения молекулы гуминовой кислоты, что может быть обусловлено снижением микробиологической активности в термокарстовом понижении в условиях их постоянного переувлажнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во МГУ, 1990. 324 с.
2. Дергачева М.И. Методы почвоведения в археологических исследованиях. Новосибирск: Новосибирск. гос. ун-т, 2007. 96 с.
3. Калабин Г.А., Каницкая Л.В., Кушнарев Д.Ф. Количественная спектроскопия ЯМР природного органического сырья и продуктов его переработки. М.: Химия, 2000. 407 с.
4. Федорова Т.Е. Количественная спектроскопия ЯМР ¹³С, ¹⁷О и физиологическая активность гуминовых кислот: Автореф. дис. ... канд. хим. наук. Иркутск, 2000. 24 с.
5. Ковалевский Д.В. Исследование структуры гуминовых кислот методами спектроскопии ЯМР ¹Н и ¹³С. Дис. ... канд. хим. наук. М., 1998. 140 с.
6. Simpson A.J., Burdon J., Graham C.L. Interpretation of heteronuclear and multidimensional NMR spectroscopy

- py of humic substances // *Eur. J. Soil Sci.* 2001. V. 52. P. 495–509.
7. Schilling M., Cooper W.T. Effects of chemical treatments on the quality and quantitative reliability of solid-state ^{13}C NMR spectroscopy of mineral soils // *Analyt. Chim. Acta.* 2004. V. 508. P. 207–216.
 8. Мельничук Н.Л. Геокриологические условия южной части Витимского плоскогорья // Геокриологические условия Забайкалья и Прибайкалья. М.: Наука, 1967. С. 71–79.
 9. Цыбенков Ю.Б., Чимитдоржиева Г.Д., Чимитдоржиева Э.О., Егорова Р.А., Мильхеев Е.Ю., Давыдова Т.В., Корсунова Ц.Д.-Ц. Морфологические и физические свойства почвенной массы из криогенных трещин мерзлотных лугово-черноземных почв Забайкалья // *Почвоведение.* 2016. № 8. С. 975–981.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X16080153>
 10. Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса. М.: Изд-во МГУ, 1981. 271 с.
 11. Simpson A.J., Simpson M.J. Nuclear magnetic resonance analysis of natural organic matter // *Biophysicochemical processes involving natural nonliving organic matter in environmental systems* / Eds. Senesi N., Xing B., Huang P.M. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2009. P. 589–650.
 12. Lodygin E.D., Beznosikov V.A. Influence of soil moisture on concentrations and ^{13}C NMR profiles of lipids in three Albelvisols // *Geoderma.* 2005. V. 127. № 3–4. P. 253–262.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.12.004>
 13. Winkler A., Haumaier L., Zech W. Insoluble alkyl carbon components in soils derive mainly from cutin and suberin // *Org. Geochem.* 2005. V. 36. P. 519–529.
 14. Keeler C., Kelly E.F., Maciel G.E. Chemical-structural information from solid-state ^{13}C NMR studies of a suite of humic materials from a lower montane forest soil, Colorado, USA // *Geoderma.* 2006. V. 130. P. 124–140.
 15. Alarcón-Gutiérrez E., Floch C., Augur C., Petit J.L., Ziarelli F., Criquet S. Spatial variations of chemical composition, microbial functional diversity, and enzyme activities in a Mediterranean litter (*Quercus ilex* L.) profile // *Pedobiologia,* 2009. V. 52. P. 387–399.
 16. Tadini A.M., Pantano G., Toffoli A.L., Fontaine B., Spaccini R., Piccolo A., Moreira A.B., Bisinoti M.C. Off-line TMAH-GC/MS and NMR characterization of humic substances extracted from river sediments of northwestern São Paulo under different soil uses. Original research article // *Sci. Total Environ.* 2015. V. 506–507. P. 234–240.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.012>
 17. Ковалева Н.О., Ковалев И.В. Лигниновые фенолы в почвах как биомаркеры палеорастительности // *Почвоведение.* 2015. № 9. С. 1073–1086.
<https://doi.org/10.7868/S0032180X15090063>
 18. Knicker H., Hilscher A., González-Vila F.J., Almendros G. A new conceptual model for the structural properties of char produced during vegetation fires // *Org. Geochem.* 2008. V. 39. P. 935–939.
 19. Duarte R.M.B.O., Silva A.M.S., Duarte A.C. Two-dimensional NMR studies of water-soluble organic matter in atmospheric aerosols // *Environ. Sci. Technol.* 2008. V. 42. P. 8224–8230.
 20. Ковалева Н.О., Ковалев И.В. Биотрансформация лигнина в лесных почвах // *Лесоведение.* 2006. № 3. С. 57–63.
 21. Лодыгин Е.Д., Безносиков В.А. Изучение молекулярной структуры гумусовых кислот подзолистых и болотно-подзолистых почв методом ^{13}C -ЯМР спектроскопии // *Почвоведение.* 2003. № 9. С. 1085–1094.

NMR-Spectroscopy of Humic Acids in Soils of Thermokarst Depressions and Numerous Heaving Mounds

E. Y. Milkheev^{a, #} and Y. B. Tsybenov^a

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

[#]*E-mail: evg-milh@rambler.ru*

Bioclimatic conditions of soil formation in the cryoarid climate zone of Transbaikalia determine the specific composition of humic substances. However, the heterogeneity of these compounds, as well as the widely used classical methods for the analysis of organic matter, do not make it possible to judge with a sufficient degree of confidence the structure of high-molecular organic compounds in the soils of the permafrost zone. ^{13}C -NMR spectroscopy of the preparations of humic acids (HA) of the studied soils (cryomorphoses) made it possible to identify the ranges of chemical shifts belonging to carbon atoms of various functional groups and molecular fragments. A comparative analysis of the molecular composition of the HAs of the studied soils showed that the transition from numerous heaving mounds to thermokarst depressions transforms the structural and functional parameters of humic acids. This is reflected in a decrease in the proportion of aromatic fragments and an increase in labile carbohydrate, amino acid and methoxyl residues. An increase in the proportion of aliphatic structures and a decrease in the proportion of aromatic fragments in the composition of HA preparations suggest a simplification of the structure of the humic acid molecule, which may be due to a decrease in microbiological activity in thermokarst depression under conditions of their constant waterlogging.

Key words: humic substances, humic acids, NMR spectroscopy, heave mounds, thermokarst depressions.

УДК 631:811:631.813:631.84:631.862.1

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АГРОКЛИМАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВ ВЕРХНЕВОЛЖЬЯ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ УДОБРЕНИЙ

© 2021 г. В. В. Окорков^{1,*}, О. А. Фенова¹, Л. А. Окоркова¹

¹ Верхневолжский федеральный аграрный научный центр
601261 Владимирская обл., Суздальский р-н, пос. Новый, Россия

*E-mail: okorkovvv@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.12.2020 г.

После доработки 04.01.2021 г.

Принята к публикации 11.01.2021 г.

В продолжающемся длительном стационарном опыте на серых лесных почвах Верхневолжья в 4-й ротации 7-польного севооборота исследовали влияния систем удобрения на урожайность возделываемых культур и продуктивность севооборота. Получены новые данные действия минеральных и последствий органических удобрений на эти показатели. Повышающее продуктивность севооборота влияние удобрений лимитировалось размерами использования культурами влаги, иногда — и фотосинтетической активной радиации. Впервые приведены количественные данные влияния азота органических и минеральных удобрений на накопление нитратного азота в ранние сроки вегетации культур, их определяющую роль в повышении их урожайности. Они объясняют более высокую роль азота органических удобрений по сравнению с азотом минеральных в поддержании и улучшении гумусового состояния серых лесных почв Верхневолжья, формирование пула экстра-азота при применении высоких доз минеральных удобрений.

Ключевые слова: серые лесные почвы, Верхневолжье, стационарный полевой опыт, органические и минеральные удобрения, урожайность, продуктивность, севооборот.

DOI: 10.31857/S0002188121040128

ВВЕДЕНИЕ

Верхневолжский регион — составная часть Центрального экономического района России. В нем находится >30% пашни. Ее площадь составляет 4402.6 тыс. га, сенокосов — 1445, пастбищ — 1354.2 тыс. га [1].

Дерново-подзолистые почвы Верхневолжья имеют сильно варьирующую кислотность (pH_{KCl} 4.0–6.0), в подпахотных горизонтах высокое содержание обменного алюминия. Преобладает степень насыщенности основаниями 43–75%, содержание гумуса меняется в пределах 0.8–1.8%. Они недостаточно обеспечены подвижными соединениями азота и фосфора, обменным калием и доступными растениям формами микроэлементов.

По степени оподзоленности преобладают сильноподзолистые почвы (42%). В основе повышения их плодородия лежит химическая мелиорация и применение удобрений. Гранулометрический состав представлен удобными для обработки средними (30%) и легкими (25%) суглинками, а также

супесями (34%). Остальные площади примерно наполовину занимают песчаные и тяжелосуглинистые почвы.

Среди типичных подзолистых почв в Верхневолжье имеются островки темноцветных почв, сходных по своим признакам с зональными серыми лесными почвами, так называемые почвы ополей. Они занимают площадь 830 тыс. га, в том числе 305 тыс. га пашни (6.9% площади пашни региона). Это уникальное природное образование составляет значительную часть пашни (33%) Владимирской обл. [2]. В последние годы на них получают >70% валовой сельскохозяйственной продукции. Эти почвы встречаются в Ивановской и Ярославской обл. [1] в виде отдельных включений в дерново-подзолистые почвы.

Распаханные серые лесные почвы имеют значительный обрабатываемый горизонт (25–30 см), более высокое содержание гумуса (2.3–4.5%), меньшую кислотность (pH_{KCl} 5.2–6.5). Они нередко богаты карбонатами и отличаются высокой степенью насыщенности основаниями (75–95%),

а также лучше обеспечены азотом и зольными элементами [3]. По всему почвенному профилю в них отсутствует обменный алюминий в количествах, токсичных для корневых систем возделываемых культур [4, 5]. В силу особенностей минералогического состава [2] и более высокого содержания гумуса (по сравнению с дерново-подзолистыми почвами) серые лесные почвы имеют емкость поглощения 15–33 мг-экв/100 г почвы.

На дерново-подзолистых почвах Центрально-го региона [1, 6, 7] выявлена решающая роль азотных удобрений в повышении продуктивности возделываемых полевых культур. Азотные удобрения и навоз оказывали главенствующее влияние на продуктивность 8- и 7-польных севооборотов на серых лесных почвах Верхневолжья [2, 8–11], в которых изучали и взаимосвязь продуктивности севооборотов с изменением агрохимических свойств почв при применении удобрений. В этих исследованиях установлено, что средняя ежегодная продуктивность изученных севооборотов при тесной степенной или гиперболической зависимостям увеличивалась с ростом запасов нитратного азота в слое 0–40 см почвы (в ранние периоды вегетации культур), которые представляли основу мобильного фонда азота. Последний оценивали по сумме запасов нитратного и аммонийного азота, находящегося в жидкой фазе почвы в слое 0–40 см. Считали, что нитратный азот полностью находится в жидкой фазе, аммонийный – частично. В то же время лишь в работе [12] выявили связь запасов нитратного азота и его мобильного фонда с продуктивностью зерновой культуры (овса).

Недостаточно исследований и многолетней динамики запасов аммонийного азота в изученных почвах. В работе [13] показано, что за период интенсивной химизации в серых лесных почвах ополья резко возросло содержание N-NH₄. Например, в слое почвы 0–40 см его запасы еще в течение 1992–2008 гг. сохранялись на высоком уровне (174–201 кг/га). Снижение их во 2-й срок наблюдений (середина вегетации возделываемых культур) по сравнению с 1-м (всходы яровых, отрастание трав и озимых) в среднем в ротации в вариантах опыта варьировало от 13 до 29 кг/га (среднее = 21 кг/га). В 3-й ротации 7-польного севооборота (2007–2015 гг.) запасы аммонийного азота в слое 0–40 см почвы по сравнению с 1-й и 2-й ротациями снизились со 174–201 до 96–127 кг/га, а соответствующие размеры их снижения во 2-й срок наблюдений по сравнению с 1-м менялись от 8 до 33 кг/га (среднее = 18) [9]. В 3-й и 4-й ротациях произошло уменьшение доли перехода N-NH₄

почвы в жидкую фазу с 4.6 до 2.5–2.2% [13]. Это свидетельствовало о заметном снижении участия запасов аммонийного азота, сформировавшихся в ранний период вегетации культур, в их питании. Поэтому основную роль в питании растений азотом в 4-й ротации должны были играть запасы нитратного азота. Из-за этого размеры мобильного фонда азота в продолжавшемся длительном опыте в 4-й ротации оценивали лишь по запасам нитратного азота.

Установленной нами гиперболической или степенной зависимости средней продуктивности изученных севооборотов [2, 8–11] от мобильного фонда азота или запасов N-NO₃ не было дано достаточно корректного объяснения.

Цель работы – в 4-й ротации 7-польного зернотравяного севооборота длительного полевого опыта на серых лесных почвах Верхневолжья оценить влияние различных систем удобрения на продуктивность культур севооборота, динамику запасов нитратного и аммонийного азота в почве, взаимосвязь продуктивности культур с использованием фотосинтетической активной радиации и выпадающих осадков при применении удобрений.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В 4-й ротации 7-польного севооборота в длительном полевом опыте на серых лесных почвах [2] исследования проводили в следующих вариантах: 1 – занятой пар (викоовсяная смесь), 2 – озимая (яровая) пшеница, 3 – овес с подсевом трав (клевер + тимофеевка), 4 – травы 1-го года пользования, 5 – травы 2-го года пользования, 6 – яровая пшеница, 7 – ячмень. Повторность опыта трехкратная, площадь делянки 100 м² (5 м × 20 м). Размещение делянок рендомизированное.

В начале 1-й ротации (1991–1993 гг.) провели известкование по полной гидролитической кислотности. Во 2-й, 3-й и 4-й ротациях исследования вели при последствии известкования. На его фоне во всех ротациях изучали влияние доз подстилочного навоза КРС (0, 40, 60 и 80 т/га), вносимых после уборки занятого пара, и ежегодного применения минеральных удобрений на урожайность культур севооборота, использование ими выпадающих осадков, изменение агрохимических свойств серых лесных почв. В опыте был абсолютный контроль.

В 4-й ротации 7-польного севооборота под однолетние травы в варианте одинарная доза полного минерального удобрения вносили только N_{aa} 60, в варианте двойной дозы NPK – то же удобрение в дозе N75. Под зерновые культуры и травы

1-го и 2-го года пользования в качестве одинарных доз использовали Р40К40 и N40P40K40. Под травы 1-го года пользования во всех ротациях в качестве двойной дозы использовали N40P80K80. Применяли N_{aa} , P_{cd} (P_c) и K_x . Фосфорно-калийные удобрения вносили осенью под основную обработку почвы, азотные – весной под предпосевную культивацию под однолетние травы и яровые зерновые, а также в подкормку озимых и многолетних трав. Фосфорно-калийные удобрения под травы 1-го года пользования вносили поверхностно после уборки покровной культуры, под травы 2-го года пользования – осенью поверхностно после уборки трав 1-го года пользования.

Перед закладкой опыта сумма поглощенных оснований варьировала от 22.0 до 22.6, гидролитическая кислотность – от 3.2 до 4.6 мг-экв/100 г почвы, степень насыщенности основаниями – от 83 до 87%. Почва характеризовалась незначительной обменной кислотностью (0.09–0.13 мг-экв/100 г почвы). Низкие величины обменной кислотности и отсутствие обменного алюминия как в пахотном, так и подпахотном горизонтах, не оказывали отрицательного влияния на возделываемые культуры, в поисках влаги не препятствовали проникновению их корневых систем в подпахотные горизонты. Обеспеченность подвижным фосфором (по Кирсанову) была повышенная или высокая, обменным калием (по Масловой) – такая же [2].

Во всех 4-х ротациях солому зерновых культур при сплошной уборке комбайном (после учета урожайности) измельчали и запахивали. Солому овса просто измельчали.

Агрохимические анализы почвы и растений выполняли по методикам, изложенным в работе [14]. Подвижный фосфор в почве определяли по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО, обменный калий – по методу Масловой, нитратный азот – потенциометрическим методом с помощью ионоселективного электрода на нитраты, аммонийный азот – фотоколориметрическим методом в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26489). Статистическую обработку результатов проводили с использованием программ STAT VIUA и EXCEL.

С учетом соотношения зерна и соломы, количества оставленных в почве пожнивно-корневых остатков [15, 16], как в работе [17], проводили расчет коэффициента использования фотосинтетической активной радиации для условий Владимирского ополья.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 представлены данные влияния удобрений на продуктивность культур севооборота в 4-й ротации. Урожайность викоовсяной смеси (ц з.е./га) изменялась от 18.0 (абсолютный контроль) и 19.0 ц/га (фон известкования) до 27.3 ц з.е./га в варианте последействия навоза 80 т/га (3-я ротация) и применения $N_{aa}75$. Последействие фосфорно-калийных удобрений, внесенных в 3-й ротации, по сравнению с фоном известкования достоверно повысило урожайность на 2.4 ц з.е./га, а последействие доз NPK, также внесенных в 3-й ротации, и действие азотных удобрений в 4-й ротации более значимо повышало урожайность этих культур (до 25.4–25.7 ц з.е./га). Дальнейшего роста урожайности этих культур от последействия навоза и действия азотных удобрений по сравнению с одним их действием и последействием NPK (сравнение вариантов 10 и 11, 13 и 14, 16 и 17 по сравнению с вариантами 4 и 5) не установлено. Хотя от последействия навоза 60 и 80 т/га урожайность однолетних трав возрастала с 19.0 до 21.8–22.5 ц з.е./га.

Максимальная урожайность однолетних трав (33.3 ц з.е./га) была достигнута в 2016 г. В этом году отмечено высокое количество выпавших осадков зимнего и ранневесеннего периодов (298 мм, что на 93 мм больше среднемноголетних) и 133 мм в вегетационный период (среднемноголетнее – 121 мм). Летний период характеризовался высокой суммой температур $>10^{\circ}\text{C}$ (2347 $^{\circ}\text{C}$ при средней многолетней 2077 $^{\circ}\text{C}$) [2, с. 9, 11]. Использование фотосинтетической активной радиации (ФАР) при максимальной урожайности трав составило 3.4%.

Средняя урожайность озимой (2015–2016 гг.) и яровой (2017 г.) пшеницы в контроле и на фоне известкования составила 44.0 и 44.5 ц/га зерна (различия в урожайности озимой и яровой пшеницы в эти годы были невысокими). Не установлено достоверного увеличения урожайности этих культур от фосфорно-калийных удобрений. Резко возросла она от применения N40P40K40 (с 44.5 до 62.3 ц/га). Сочетание этой дозы полного минерального удобрения с навозом 40 и 60 т/га достоверно не повысило урожайность пшеницы, хотя сочетание этой дозы с навозом 80 т/га увеличило ее на 5.0 ц/га. От двойной дозы N80P80K80 по сравнению с одинарной наблюдали достоверный рост урожайности зерна пшеницы 4.5 ц/га, а ее сочетание с дозами навоза не привело к дальнейшему достоверному росту.

Максимальная урожайность зерна озимой пшеницы 72.6 ц/га получена в 2016 г., когда расте-

Таблица 1. Продуктивность культур 7-польного севооборота в 4-й ротации, ц з.е./га

Вариант	Викоовая смесь, 2014–2016 гг.	Пшеница, 2015–2017 гг.	Овес, 2016–2018 гг.	Травы 1-го года пользования, 2017–2019 гг.	Травы 2-го года пользования, 2018–2020 гг.	Яровая пшеница, 2019–2020 гг.	Ячмень, 2020 г.	Средняя продуктивность, 2014–2020 гг.
1. Контроль	18.0	44.0	29.5	50.0	24.8	33.5	42.2	34.6
2. Известкование	19.0	44.5	29.8	50.2	24.8	33.8	41.2	34.8
3. P240K240	21.4	46.9	31.6	54.6	26.0	34.7	46.6	37.4
4. N300P240K240	25.4	62.3	40.5	50.1	32.1	40.4	51.2	43.1
5. N515P480K480	25.7	66.8	41.4	48.2	36.5	42.4	56.1	45.3
6. Навоз 40 т/га	21.0	53.4	32.3	55.1	27.6	37.2	47.2	39.1
7. Навоз 60 т/га	21.8	54.8	34.4	54.4	28.5	38.4	47.3	39.9
8. Навоз 80 т/га	22.5	54.1	36.5	52.7	30.5	39.1	48.8	40.6
9. Нав40 + P240K240	21.8	52.9	32.8	55.0	28.7	40.2	47.6	39.9
10. Нав40 + Нав300P240K240	25.1	64.5	41.8	52.6	34.8	42.4	54.6	45.1
11. Нав40 + N515P480K480	26.8	68.8	43.5	52.5	38.1	42.6	56.9	47.0
12. Нав60 + P240K240	21.7	54.5	35.8	53.9	28.8	40.8	48.8	40.6
13. Нав60 + N300P240K240	26.1	65.6	41.5	54.1	34.1	43.0	61.2	46.5
14. Нав60 + N515P480K480	26.8	66.7	42.9	50.2	37.5	44.6	58.4	46.7
15. Нав80 + P240K240	22.5	58.2	38.7	55.0	29.9	39.1	50.6	42.0
16. Нав80 + N300P240K240	26.6	67.3	42.7	53.5	35.5	42.8	58.7	46.7
17. Нав80 + N515P480K480	27.3	68.9	43.6	49.1	39.2	44.4	61.1	47.7
<i>HCP</i> ₀₅ , ц з.е./га	2.1	3.8	2.5	3.3	2.0	2.6	4.0	2.9
<i>T</i> , %	3.11	2.35	2.29	2.24	2.45	2.37	2.72	2.50
Максимальная урожайность/год	<u>33.3</u>	<u>72.6</u>	<u>52.6</u>	<u>69.5</u>	<u>42.9</u>	<u>44.8</u>	<u>61.2</u>	–
	2016	2016	2017	2017	2020	2019	2020	
Максимальное использование ФАР, %	3.4	3.8	3.2	3.3	3.7	2.2	3.0	–

Примечания. 1. Нав – навоз, т/га. То же в табл. 4–8. 2. Нумерация вариантов та же в табл. 5, 8.

ния этой культуры были хорошо обеспечены теплом и влагой. Использование ФАР достигло 3.8%.

Урожайность овса в контроле и на фоне известкования за 2016–2018 гг. составила 29.5 и 29.8 ц з.е./га или 36.9 и 37.2 ц зерна/га. Определяющее влияние на нее оказало действие полного минерального удобрения и последствие навоза. По сравнению с фоном известкования применение одинарной и двойной доз NPK повышало урожайность овса с 29.8 до 40.5–41.4 ц з.е./га, последствие доз навоза – до 32.3–36.5 ц з.е./га. Достоверного преимущества дозы N80P80K80 по сравнению с дозой N40P40K40 не установлено. При последствии навоза 80 т/га урожайность овса была более высокой по сравнению с последствием дозы навоза 40 т/га. Не получено достоверных преимуществ сочетания последей-

ствия органических удобрений с NPK по сравнению с действием одних последних.

Наиболее высокая урожайность зерна овса 65.8 ц/га (52.6 ц з.е./га) получена в 2017 г., когда за вегетационный период выпало 347 мм осадков (51.6% годовых) и сумма активных температур составила 1835°C (ГТК = 1.79) [9]. Это свидетельствовало об определяющем влиянии условий увлажнения и удобрений на продуктивность этой культуры. При максимальной урожайности зерна овса (65.8 ц/га) коэффициент использования ФАР равнялся 3.2%.

Максимальная продуктивность трав 1-го года пользования установлена при применении фосфорно-калийных и последствии органических (40–60 т/га) удобрений (54.4–55.1 ц з.е./га), сочетания фосфорно-калийных удобрений с органическими (53.9–55.0 ц з.е./га). По сравнению с

контролем и фоном известкования эти системы удобрения достоверно повышали урожайность, а от применения NPK и сочетания их с навозом достоверного роста продуктивности трав не выявлено. Лишь в вариантах сочетания одинарной дозы NPK с органическими удобрениями 60–80 т/га по сравнению с контролем и фоном известкования прибавка урожайности превысила величину HCP_{05} или была ей равна.

Следует отметить, что на серых лесных почвах Верхневолжья на урожайность трав 1-го года пользования оказывало влияние последствие ранее внесенных азотных удобрений (сравнение вариантов 13 и 14, 16 и 17).

В 2017 г., когда за вегетационный период выпало 347 мм осадков при величине ГТК 1.79, была получена максимальная урожайность трав (69.5 ц з.е./га или сена 139 ц/га) при использовании ФАР 3.3%.

Продуктивность трав 2-го года пользования достоверно повышалась от применения полного минерального удобрения и последствия навоза. С ростом доз NPK наблюдали достоверное увеличение их урожайности. Максимальная урожайность трав 2-го года пользования 42.9 ц з.е./га (сена 85.8 ц/га) получена в 2020 г., когда за период их вегетации (3-я декада апреля–июнь) выпало 124.5 мм осадков (при среднемноголетней норме 121 мм). Осадки выпадали относительно равномерно в течение вегетации, длительных засушливых условий не отмечено. Использование ФАР достигло 3.7%.

Урожайность зерна яровой пшеницы в зависимости от систем удобрения в среднем за 2019–2020 гг. варьировала от 33.5 до 44.6 ц/га. Определяющее влияние на нее оказало последствие органических и действие азота минеральных удобрений. Максимальная урожайность зерна (44.8 ц/га) была получена в 2019 г. при использовании 2.2% ФАР. В 2020 г., который был более благоприятным по увлажнению, из-за поражения посевов желтой ржавчиной, широко распространенной в южных регионах европейской части РФ и появившейся в последнее время в ее северных, урожайность культуры при последствии органических удобрений в сочетании с NPK снижалась на 6–8 ц/га. Это было рассчитано по отношению использованной культурой влаги в 2020 г. к коэффициенту водопотребления, установленному в 2019 г.

Урожайность зерна замыкающей 7-польный севооборот культуры ячменя менялась от 41.2 до 61.2 ц/га. Прибавка от удобрений достигала 48.5%. На урожайность культуры влияли фосфорно-калийные, азотные в составе NPK и последствие

органических удобрений. Сочетание фосфорно-калийных удобрений с последствием органических по сравнению с последними не приводило к дальнейшему достоверному росту урожайности культуры. По сравнению с одинарной дозой NPK сочетание ее с последствием навоза 60 и 80 т/га способствовало дальнейшему увеличению урожайности зерна этой культуры на 7.5–10 ц/га. Органо-минеральная система (последствие навоза 80 т/га + 2NPK) достоверно повысила урожайность ячменя по сравнению с применением только двойной дозы полного минерального удобрения на 5.0 ц/га.

Максимальная урожайность ячменя 61.2 ц/га зерна получена при сочетании одинарной дозы NPK с последствием навоза 60 т/га. В этом варианте использование ФАР составило 3.0%.

В работе [17] установлено, что на серых лесных почвах Владимирского ополья при применении удобрений потребляемое количество осадков (326–356 мм) яровыми культурами соответствовало использованию 2.7–3.0% ФАР и обеспечивало получение урожая зерна 54–60 ц/га, озимыми рожью и пшеницей (386 мм) – ~4% ФАР. Урожайность зерна последних могла достигать 71–80 ц/га. Лимитирующим урожай яровых и озимых культур фактором являлась влагообеспеченность растений.

В 4-й ротации 7-польного севооборота средняя ежегодная продуктивность культур в зависимости от систем удобрения варьировала от 34.6–34.8 (контроль, фон известкования) до 47.7 ц з.е./га (сочетание навоза 80 т/га за ротацию с двойной дозой NPK). В 1-й и 2-й ротациях 8-польного севооборота (1991–2008 гг.) она изменялась от 29.0–32.9 до 41.5–43.3 ц з.е./га, в 3-й (2007–2015 гг., 7-польный севооборот) – от 30.8 до 45.5 ц з.е./га [9]. С увеличением длительности применения удобрений она неуклонно возрастала.

Математические зависимости между урожайностью культур севооборота, с одной стороны, и дозами применения органических удобрений в поле занятого пара (x_1 , т/га) и ежегодными дозами внесения азота в составе полного минерального удобрения (x_2 , кг/га), фосфорно-калийных (x_3 , кг/га, в расчете на P_2O_5) удобрений, с другой стороны, представлены в табл. 2. Они подтвердили определяющее влияние навоза КРС и азота минеральных удобрений как на урожайность отдельных культур севооборота, так и на среднюю его продуктивность.

Судя по величинам угловых коэффициентов при x_1 и x_2 , наиболее высокая прибавка урожайности от навоза и азота минеральных удобрений

Таблица 2. Взаимосвязь влияния удобрений на урожайность культур 7-польного севооборота в 4-й ротации, ц з.е./га

Культура, годы	Уравнение взаимосвязи, $n = 16$	Доверительный интервал	R^2
Викоовсяная смесь, 2014–2016	$Y = 20.5 + 0.023z_1 + 0.070x_2$	1.2	0.958
	$Y = 19.3 + 0.035z_1 + 0.064x_2 - 0.0003z_1z_3$	1.0	0.973
Озимая пшеница, 2015–2017	$Y = 49.4 + 0.086x_1 + 0.203x_2$	6.1	0.871
	$Y = 46.6 + 0.130x_1 + 0.499x_2 - 0.0015x_1x_2 - 0.003x_2x_3$	2.8	0.977
Овес, 2016–2018	$Y = 32.1 + 0.055x_1 + 0.118x_2$	4.0	0.846
	$Y = 30.4 + 0.080x_1 + 0.308x_2 - 0.0008x_1x_2 - 0.002x_2x_3$	2.1	0.964
Травы 1-го года пользования, 2017–2019	$Y = 52.8 + 0.024x_1 + 0.064x_2$	3.7	0.436
	$Y = 51.3 + 0.116x_1 + 0.089x_3 - 0.0012x_1^2 - 0.0013x_2^2 - 0.0013x_3^2$	2.5	0.808
Травы 2-го года пользования, 2018–2020	$Y = 26.2 + 0.046x_1 + 0.124x_2$	1.8	0.967
	$Y = 24.9 + 0.066x_1 + 0.177x_2 + 0.035x_3 - 0.0008x_2^2 - 0.0005x_1x_3$	1.1	0.990
	$Y = 26.0 + 0.046x_1 + 0.180x_2 - 0.0007x_2^2$	1.4	0.980
Яровая пшеница, 2019–2020	$Y = 36.0 + 0.048x_1 + 0.073x_2$	2.9	0.826
	$Y = 33.7 + 0.598x_1^{0.5} + 0.789x_2^{0.5} + 1.585x_3^{0.5} - 0.44(x_1x_2)^{0.5}$	1.6	0.957
Ячмень, 2020	$Y = 44.4 + 0.0783x_1 + 0.144x_2$	5.0	0.848
	$Y = 43.7 + 0.0783x_1 + 0.322x_2 - 0.0023x_2x_3$	3.7	0.924
Средняя продуктивность севооборота	$Y = 36.7 + 0.406x_1 + 0.111x_2$	2.6	0.918
	$Y = 35.8 + 0.386x_1 + 0.205x_2 + 0.049x_3 - 0.0019x_2^2$	1.6	0.972

Примечание. x_1 – доза навоза, внесенная в паровом поле, т/га; x_2 – ежегодно вносимая доза азота, кг/га; x_3 – ежегодно вносимая доза РК-удобрений в расчете на P_2O_5 , кг/га; z_1 – последствие доз навоза, внесенных в 3-й ротации (40, 60 и 80), т/га.

на серых лесных почвах была получена для озимой пшеницы, овса, трав 2-го года пользования и ячменя. В то же время на среднеплодородных почвах Нечерноземья разностные коэффициенты использования, например азота, по годам после внесения органических удобрений оценивали величинами: 1-й – 20–30%, 2-й – 30–35, 3-й – 10–15, 4-й – 5% [18]. Следовательно, размеры и длительность влияния органических удобрений на урожайность возделываемых культур зависели как от типа почвы, так и вида севооборота, а также погодных условий.

По сумме угловых коэффициентов при x_1 (z_1) для линейных взаимосвязей для отдельных культур определили суммарную прибавку, приходящуюся на 1 т навоза за севооборот (0.360 ц з.е./га). При среднем содержании 4.4 кг N/т прибавка на 1 кг азота органических удобрений составила 0.082 ц з.е./га.

По сумме угловых коэффициентов за севооборот при x_2 линейных взаимосвязей (0.796 ц/га), деленной на число полей, нашли прибавку урожайности культур при применении 1 кг азота ми-

неральных удобрений (0.114 ц з.е./га). При этом эквивалент минеральных удобрений (ЭМУ) навоза для азота составил 0.72. В то же время из линейной взаимосвязи средней продуктивности севооборота со среднегодовым применением навоза (т/га) и азота минеральных удобрений ЭМУ навоза для азота равнялся 0.83 (0.406 : 4.4 : 1.11 = 0.83). Средняя величина ЭМУ навоза для азота, рассчитанная из линейных взаимосвязей урожайности (продуктивности) культур севооборота, составила 0.78. Очевидно, эта величина ЭМУ навоза для азота близка к эффективности его использования при применении одних органических удобрений в сравнении с одними минеральными азотными.

Для всех культур севооборота при квадратичной зависимости выявлена более тесная связь между их урожайностью и примененными удобрениями, чем при линейной зависимости. Поэтому для расчета ЭМУ навоза для азота использовали и эту взаимосвязь средней продуктивности севооборота с удобрениями. Для этого угловой коэффициент при x_1 делили на величину содер-

Таблица 3. Размеры использования влаги культурами севооборотов в разные годы от среднегодового выпадения осадков

Культура	Количество выпадающих осадков, мм	Использование осадков в 4-й ротации		Использование осадков во 2-й и 3-й ротациях [17]	
		мм	%	мм	%
Викоовсяная смесь	480	180	38	254	53
Озимые	604	290	48	386	64
Овес	604	254	42	338	56
Травы 1-го года пользования	604	374	62	412	68
Травы 2-го года пользования	480	190	40	278	58
Яровая пшеница	604	318	53	356	59
Ячмень	604	317	52	326	54

жания азота в 1 т навоза и на угловой коэффициент при x_2 . ЭМУ навоза для азота в этом случае был равен 0.43 ($0.386 : 4.4 : 0.205 = 0.43$). Последняя теоретическая величина указывала на минимальный ЭМУ навоза для азота, когда применяют совместно невысокие дозы органических и минеральных азотных удобрений. В этом случае отзывчивость культур севооборота на азотные минеральные удобрения наиболее высокая. С увеличением доз органических и минеральных удобрений рост урожайности возделываемых культур от азота минеральных удобрений замедляется, а ЭМУ навоза для азота повышается. Максимум роста продуктивности от минерального азота культуры достигали при дозе N54. Величина ЭМУ навоза для азота должна была возрасти до 0.86. При средних ежегодных дозах навоза 5.7 (25 кг N/га), 8.6 (38 кг N/га) и 11.4 (50 кг N/га) т/га ЭМУ навоза для азота составит соответственно 0.55, 0.65 и 0.79. Сочетание органических удобрений с NPK обеспечивало больший рост содержания гумуса, чем от такой же дозы азота минеральных удобрений.

Рассчитанные в работах [2, 8–11] степенные или гиперболические зависимости между средней продуктивностью севооборота и мобильным фондом азота или запасами нитратного азота в слое 0–40 см почвы в ранний период вегетации культур могут свидетельствовать о том, что лимитирующими урожайность возделываемых культур факторами являются не только обеспеченность элементами питания, но и какие-либо другие. По нашему мнению, главнейшим из них является недостаток влаги, особенно в критические периоды роста и развития культур [17]. Поэтому режим влагообеспеченности в большинстве опытов был основным лимитирующим фактором формирования урожая.

При обобщении результатов исследования установлено (табл. 3), что на серых лесных почвах Владимирского ополья возделываемые культуры использовали 250–410 мм влаги [17], но эффективность ее расходования сильно зависела от погодных условий года, своевременности выпадения осадков. Например, общий расход влаги культурами севооборота в 4-й ротации варьировал от 180–190 (викоовсяная смесь и многолетние травы 2-го года пользования) до 374 мм – травами 1-го года пользования. Яровые и озимые культуры за весенне-летний период расходовали от 254 до 320 мм влаги. От среднегодовых размеров выпадения осадков за соответствующий период это составило 38–62, во 2-й и 3-й ротациях севооборотов [17] – 53–68%. Поэтому для повышения эффективности использования выпадающих осадков необходимо возделывание поукосных и промежуточных культур.

Показано, что и в 4-й ротации 7-польного севооборота эффективность использования влаги, соответственно – фотосинтетической активной радиации сильно зависела от систем удобрения (табл. 4). Применение навоза по сравнению с фоном известкования заметно снижало размеры потребления влаги на создание 1 ц з.е. Это наблюдали как при его действии (2-я культура), так и последствии. Наименьшее его последствие установлено на травах 1-го года пользования. В среднем в ротации применение органических удобрений повысило эффективность использования влаги на 14%. По сравнению с фоном известкования при сочетании навоза с NPK эффективность использования влаги возросла в 1.35 раза. Различий в использовании влаги между дозами применения полного минерального удобрения не наблюдали.

Таблица 4. Использование влаги культурами 7-польного севооборота в зависимости от систем удобрения

Вариант	Запасы влаги в 1-метровом слое почвы, мм		Осадки вегетационного периода, мм	Общий расход влаги, мм	Урожайность, ц з.е./га	K _{вод} , мм/ц з.е.	Использование влаги из слоя 40–100 см, мм	
	исходные	после уборки					среднее	максимальное
1-я культура, викоовсяная смесь, 2014–2016 гг.								
Известкование (фон)	291	247	132	176	19.0	9.3	30	52
Фон + навоз 60 т/га	291	242	132	181	21.8	8.3	31	54
Фон + Нав60 + N60	288	241	132	179	26.1	6.9	36	60
Фон + Нав60 + N75	290	240	132	182	26.8	6.8	34	58
2-я культура, озимая (2015–2016 гг.) и яровая (2017 г.) пшеница								
Известкование (фон)	304	250	231	285	44.5	6.4	45	58
Фон + навоз 60 т/га	297	240	231	288	52.8	5.5	49	58
Фон + Нав60 + N40P40K40	295	235	231	291	65.6	4.4	53	66
Фон + Нав60 + N80P80K80	298	234	231	295	66.7	4.4	55	66
3-я культура, овес, 2016–2018 гг.								
Известкование (фон)	289	240	195	244	29.8	8.2	41	56
Фон + навоз 60 т/га	295	230	195	260	34.4	7.6	48	54
Фон + Нав60 + N40P40K40	290	230	195	255	41.5	6.1	55	61
Фон + Нав60 + N80P80K80	291	227	195	259	42.9	6.0	53	61
4-я культура, травы 1-го года пользования, 2017–2019 гг. (2 укоса)								
Известкование (фон)	299	211	283	371	50.2	7.4	62	99
Фон + навоз 60 т/га	296	204	283	380	54.3	7.0	62	94
Фон + Нав60 + N40P40K40	291	203	283	371	54.1	6.9	56	91
Фон + Нав60 + N40P80K80	292	204	283	373	50.2	7.4	56	104
5-я культура, травы 2-го года пользования, 2018–2020 гг.								
Известкование (фон)	286	224	129	191	22.3	8.6	42	56
Фон + навоз 60 т/га	281	219	129	191	26.0	7.4	36	43
Фон + Нав60 + N40P40K40	280	222	129	187	31.6	5.9	40	59
Фон + Нав60 + N80P80K80	284	223	129	190	35.7	5.3	40	54
6-я культура, яровая пшеница, 2019–2020 гг.								
Известкование (фон)	296	237	265	324	33.8	9.6	47	66
Фон + навоз 60 т/га	293	240	265	318	38.4	8.3	37	53
Фон + Нав60 + N40P40K40	291	246	265	309	43.0	7.2	35	48
Фон + Нав60 + N80P80K80	288	233	265	320	44.6	7.2	37	48
7-я культура, ячмень, 2020 год								
Известкование (фон)	297	222	240	318	41.2	7.7	46	46
Фон + навоз 60 т/га	304	230	240	315	47.3	6.6	54	54
Фон + Нав60 + N40P40K40	294	224	240	310	61.2	5.1	49	49
Фон + Нав60 + N80P80K80	297	213	240	324	58.4	5.6	53	53

Примечание. Для 2-й культуры приведены данные по использованию влаги за весенне-летний период вегетации.

В связи с благоприятными физико-химическими свойствами подпахотных горизонтов (низкое содержание обменного алюминия) для всех культур севооборота установлено активное поглощение влаги из слоя почвы 40–100 см. В сред-

нем для зерновых культур и однолетних трав оно варьировало от 30 до 55 мм, в отдельные годы — от 55 до 66 мм. За период вегетации трав 1-го года пользования из-за промачивания летними осадками слоев глубже 40 см использование влаги из

слоя 40–100 см достигало 104 мм. Использование влаги из подпахотных горизонтов позволило возделываемым культурам уменьшить влияние стрессовых ситуаций в засушливые периоды, что стабилизировало их урожайность на достаточно высоком уровне. В среднем в ротации севооборота максимальные размеры использования влаги из слоя 40–100 см почвы слабо зависели от систем удобрения (59–63 мм).

Данные табл. 1 и 2 показали, что решающее влияние на урожайность культур севооборота оказало применение органических и азота минеральных удобрений. В работах [2, 8, 9, 11] выявлено, что они значительно повышали запасы нитратного и аммонийного азота в жидкой фазе почвы, т.е. размер мобильного фонда азота. Установлено также [13], что уже в 3-й ротации по сравнению с 1-й и 2-й запасы $N-NH_4$ снижались в 3–4 раза, резко уменьшились его переход в жидкую фазу почвы и доля участия в мобильном фонде азота. Величину последнего можно приравнять к запасам $N-NO_3$ в слое 0–40 см почвы в ранний период вегетации культур. В этом случае отсутствовала необходимость расчета запасов аммонийного азота в жидкой фазе почвы, который выполняли обычно в середине или конце вегетации культур. Поэтому в 4-й ротации были проведены исследования влияния систем удобрения как на динамику запасов как нитратного, так и аммонийного азота, в почве под отдельными культурами и в среднем за севооборот.

Показано (табл. 5), что в вариантах 1–3 без внесения азотных минеральных удобрений запасы $N-NO_3$ в слое 0–40 см почвы в ранний период вегетации культур варьировали от 22.9 до 72.8 кг/га. Наиболее низкими (22.9–26.8 кг/га) они были под многолетними травами, под которыми происходило уплотнение почвы, и процессы нитрификации шли более медленно. В среднем за севооборот этот показатель составил ≈ 44 кг/га и был близок к результатам, полученным в работах [2, 9]. Применение N_{aa} в составе НРК увеличивало запасы $N-NO_3$ до 60.3–143 кг/га при одинарной дозе и до 98.7–192 кг/га при двойной дозе полного минерального удобрения. При сочетании N_{aa} с навозом наблюдали дальнейший небольшой рост этого показателя. Внесение одних органических удобрений и их сочетание с РК-удобрениями вело к росту запасов $N-NO_3$ по сравнению с вариантами 1–3 в среднем в севообороте на 2–24 кг/га, в то время как применение одних азотных удобрений – на 52–95, их сочетания с навозом – на 60–117 кг/га. Процессы накопления нитратного азота в почве под травами 1-го года пользования зави-

сели и от доз внесения N_{aa} под предшествующие культуры (варианты 4 и 5, 10 и 11, 13 и 14, 15 и 16).

В середине вегетации культур (1-я декада июля) исходные запасы нитратного азота резко снижались (в основном за счет интенсивного потребления). В вариантах с применением азотных удобрений они уменьшились в 4 раза, органических удобрений и без удобрений – в 2–3 раза. Но в последних вариантах абсолютные запасы $N-NO_3$ были в несколько раз меньше, чем в вариантах удобрения азотом. Таким образом, в удобрениях N_{aa} варианты поглощение $N-NO_3$ было в несколько раз больше, чем без его применения. В результате этого наблюдали и более высокую продуктивность культур в первом случае (табл. 1).

Из взаимосвязей величин запасов $N-NO_3$ в слое 0–40 см почвы в ранний период вегетации культур и доз азота удобрений видно, что 1 кг азота внесенных органических удобрений/га ежегодно повышал запасы $N-NO_3$ на 0.027–0.109 кг/га, 1 кг N_{aa} /га – на 1.04 кг/га и больше (табл. 6). Даже при действии навоза этот параметр при x_1 составил 0.063 кг/га. За севооборот 1 кг азота навоза повышал запасы $N-NO_3$ в ранний период вегетации культур на 0.380–0.395 кг, 1 кг N_{aa} /га – на 1.30 кг.

Близкие размеры влияния 1 кг азота органических удобрений на повышение запасов нитратного азота за ротацию наблюдали и при суммировании угловых коэффициентов при x_1 (z_1) линейных взаимосвязей: $0.051 + 0.071 + 0.061 + 0.042 + 0.027 + 0.109 + 0.0385 = 0.40$.

В то же время ЭМУ навоза для азота изменялся от 0.55 до 0.79. Очевидно, что часть нитратного азота органических удобрений, появлявшаяся при их минерализации в осенний период, весной передвигалась глубже 40 см [19]. Минеральные азотные удобрения вносили после схода снежного покрова. Их передвижение в весенний период глубже 40 см можно было наблюдать лишь в отдельные годы.

Видно также, что квадратичная взаимосвязь величин запасов нитратного азота за ротацию и среднегодовых доз азота навоза и минеральных удобрений показала, что пул дополнительно образованного азота (экстра-азота) резко возрастает при внесении высоких доз минерального азота.

Как и в работах [2, 9], установлена тесная степенная связь между средней продуктивностью 7-польного севооборота и среднегодовыми запасами $N-NO_3$ в слое 0–40 см почвы в ранний период вегетации культур (рис. 1). Она свидетельствовала о том, что запасы нитратного азота не лимитировали продуктивность. Ограничивали ее чаще

Таблица 5. Запасы нитратного азота в слое 0–40 см почвы в начале и середине вегетации (уборка однолетних трав и трав 2-го года пользования) культур севооборота, кг/га

Вариант	Культуры, годы							Среднее, 2014–2020 гг.
	Викоовся- ная смесь, 2014–2016	Озимая пшеница, 2015–2017	Овес, 2016–2018	Травы 1-го г.п., 2017–2019	Травы 2-го г.п., 2018–2020	Яровая пшеница, 2019–2020	Ячмень, 2020	
Запасы в ранний период вегетации культур (1-й срок)								
1	41.8	38.7	35.7	24.8	24.3	61.7	72.8	42.8
2	51.4	39.8	36.7	26.3	22.9	63.4	69.3	44.2
3	50.2	42.2	36.5	24.4	23.3	64.2	68.8	44.2
4	112	69.7	89.5	72.6	60.3	143	129	96.6
5	149	150	121	103	98.7	192	166	140
6	45.4	52.1	40.8	25.4	25.4	80.4	75.7	45.7
7	60.6	58.5	49.1	28.7	27.3	92.4	82.5	57.0
8	49.7	64.4	57.9	35.1	28.4	97.3	84.3	59.6
9	60.9	52.2	52.1	26.1	28.5	95.4	75.6	55.8
10	125	81.1	92.4	81.8	64.7	162	123	104
11	162	149	126	120	105	212	164	148
12	58.9	62.4	51.5	28.0	25.7	94.4	77.5	56.9
13	130	82.9	101	85.5	66.1	162	131	108
14	163	155	135	123	118	210	169	153
15	71.4	72.8	63.3	37.2	25.4	122	87.4	68.5
16	134	91.1	99.1	91.6	73.5	174	141	115
17	169	163	150	128	119	224	179	162
Запасы в середине вегетации (во время уборки викоовсяной смеси и трав 2-го года пользования) культур севооборота								
1	18.5	16.0	12.7	10.8	11.6	27.6	8.7	15.1
2	25.0	16.8	12.5	12.1	10.5	31.0	9.5	16.8
3	22.0	16.6	11.9	12.7	12.9	31.7	8.9	16.7
4	28.9	20.5	17.7	25.1	18.5	54.7	16.6	26.0
5	35.4	45.4	28.2	35.5	30.2	65.8	23.1	37.7
6	25.3	17.2	13.4	14.4	16.0	44.4	10.3	20.1
7	23.9	17.9	16.5	16.4	16.8	42.4	10.6	20.6
8	20.9	17.4	18.5	14.3	16.9	47.3	9.7	20.7
9	21.9	16.6	13.7	16.2	18.4	46.8	8.3	20.3
10	31.6	26.0	20.0	28.6	14.6	50.2	23.3	27.8
11	29.9	45.7	28.5	44.9	29.8	64.2	28.9	38.7
12	24.1	16.4	16.4	16.3	18.5	44.4	11.6	21.1
13	27.3	21.5	20.9	30.2	14.4	47.8	13.4	25.1
14	36.2	41.0	29.5	43.1	29.8	54.2	35.9	38.5
15	26.2	22.7	17.0	18.5	17.9	50.4	15.7	24.1
16	35.4	22.4	20.1	32.4	17.7	50.6	26.2	29.3
17	38.1	47.8	38.3	45.6	37.9	65.9	38.1	44.5

всего условия увлажнения. В то же время в некоторые годы достижение высоких урожаев может ограничиваться и недостатком фотосинтетической активной радиации.

Например, урожайность зерна озимой пшеницы (рис. 2) практически по линейной зависимости увеличивалась с ростом запасов N-NO₃ до 67 ц/га при сочетании одинарной дозы NPK с

Таблица 6. Взаимосвязь величин запасов нитратного азота в слое 0–40 см почвы в ранний период вегетации культур и применения азота органических и минеральных удобрений (4-я ротация)

Культура	Год	Уравнение взаимосвязи, $n = 17$	R^2	Доверительный интервал
Викоовсяная смесь	2014–2017	$Y = 44.4 + 0.051z_1 + 1.30x_2$	0.974	16.5
		$Y = 45.4 + 0.052z_1 + 0.0185x_2^2$	0.983	13.1
Озимая пшеница	2015–2017	$Y = 38.9 + 0.063x_1 + 1.18x_2$	0.939	22.6
		$Y = 40.8 + 0.078x_1 + 0.0166x_2^2 - 0.0005x_1x_2$	0.996	6.4
Овес	2016–2018	$Y = 37.1 + 0.061x_1 + 1.07x_2$	0.985	10.0
		$Y = 39.0 + 1.07x_2 + 0.0002x_1^2$	0.986	9.5
Травы 1-го года пользования	2017–2019	$Y = 28.4 + 1.81x_2$	0.871	29.4
		$Y = 21.1 + 0.042x_1 + 1.78x_2$	0.893	27.9
Травы 2-го года пользования	2018–2020	$Y = 20.6 + 0.027x_1 + 1.04x_2$	0.990	7.6
		$Y = 25.4 + 0.894x_2 + 0.0008x_1x_2$	0.996	4.7
Яровая пшеница	2019–2020	$Y = 65.3 + 0.109x_1 + 1.59x_2$	0.974	20.1
		$Y = 63.4 + 0.108x_1 + 2.22x_2 - 0.0083x_2^2$	0.983	16.7
Ячмень	2020	$Y = 71.5 + 0.0385x_1 + 1.162x_2$	0.986	10.2
		$Y = 71.1 + 1.51x_2 + 0.0001x_1^2 - 0.0046x_2^2$	0.996	5.8
		$Y = 42.3 + 0.39x_1 + 1.30x_2$	0.994	7.2
За севооборот	2014–2020	$Y = 42.8 + 0.3945x_1 + 1.049x_2 + 0.0036x_2^2$	0.998	4.4

Примечание. x_1 – доза азота в навозе, внесенном в паром поле (4.4 кг N/т навоза); x_2 – средняя ежегодно вносимая доза азота минеральных удобрений, кг/га, z_1 – последствие доз навоза (40, 60 и 80 т/га), внесенных в 3-й ротации; за севооборот – среднегодовые дозы применения азота органических (x_1 , кг/га) и минеральных (x_2 , кг/га) удобрений.

действием навоза 80 т/га, внесенного в занятом пару. Повышение дозы NPK в 2 раза увеличивало урожайность всего на 1.6 ц/га. Расчеты по квадратичному уравнению (табл. 2) показали, что при сочетании двойной дозы NPK с навозом 60–80 т/га может достигаться урожайность зерна культуры до 94.3–97.0 ц/га. Однако в этом случае коэффициент использования ФАР должен составлять 4.9–5.0%, что может произойти при очень высоком уровне агротехники. В 7-польном зернотравяном севообороте на серых лесных почвах Верхневолжья должны применять ежегодную дозу внесения минеральных удобрений N40–45P40–45K40–45 в сочетании с навозом КРС 40–80 т/га за севооборот [2, 9]. Это обеспечивает положительный или бездефицитный баланс азота и фосфора, допустимый дефицит калия. В данном случае (рис. 1, 2) запасы N-NO₃ в слое 0–40 см почвы ($z = x + 40$) должны составлять ≈90–115 кг/га. Более высокие размеры выноса азота урожаем культур могли быть обеспечены поглощением N-NO₃ из более глубоких слоев почвы [2, 9, 19].

Между средней продуктивностью севооборота (y_{cp} , ц з.е./га) и среднегодовыми запасами нитратного азота (z_{cp} , кг/га) (рис. 1, уравнение (1)) в слое 0–40 см в ранний период вегетации культур установлена более тесная линейная связь показателей в вариантах без двойной дозы NPK:

$$y_{cp} = 36.8 + 0.135(z - 40), \quad R^2 = 0.865, \quad n = 13, \\ \text{доверительный интервал} = 3.0. \quad (1)$$

Очень тесную взаимосвязь наблюдали для тех же вариантов между величинами урожайности озимой пшеницы ($y_{оз}$, ц/га зерна) и запасов N-NO₃ (z , кг/га) в слое 0–40 см в тот же период вегетации культуры (рис. 2, уравнение (2)):

$$y_{оз} = 44.5 + 0.443(z - 37), \quad R^2 = 0.948, \quad n = 13, \\ \text{доверительный интервал} = 3.7. \quad (2)$$

Таким образом, при системах удобрения с одинарной дозой NPK запасы нитратного азота использовались наиболее эффективно.

В 4-й ротации 7-польного севооборота запасы аммонийного азота в слое 0–40 см почвы по сравнению с 1-й и 2-й ротациями 8-польного сево-

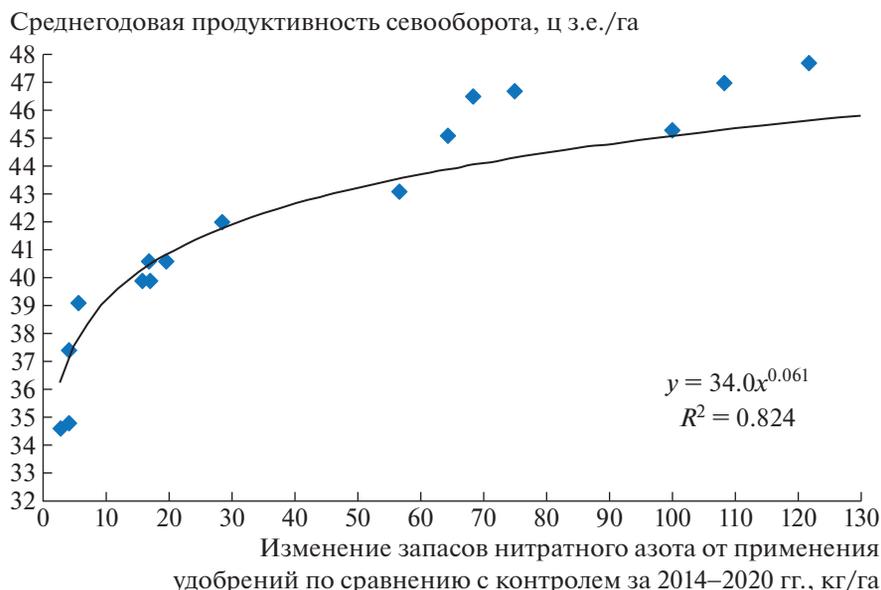


Рис. 1. Взаимосвязь средней продуктивности 7-польного севооборота (y , ц з.е./га) со среднегодовыми запасами $N-NO_3$ в слое 0–40 см почвы в ранний период вегетации культур (z , кг/га), $x = z - 40$.

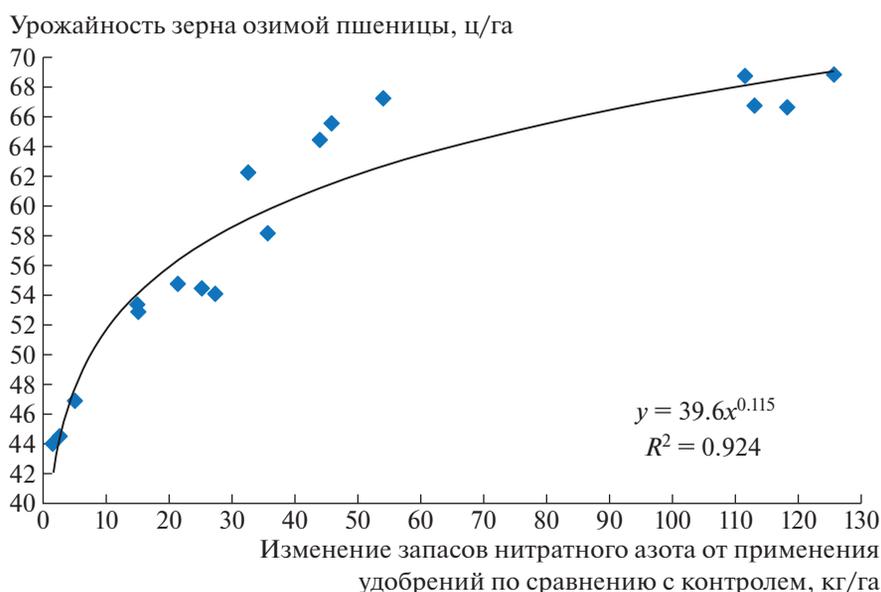


Рис. 2. Взаимосвязь между урожайностью озимой пшеницы (y , ц зерна/га) и запасами $N-NO_3$ в слое 0–40 см почвы в ранний весенний период ее вегетации (z , кг/га), $x = z - 37$.

оборота [13] снизились со 174–201 до 46–60 кг/га. В 3-й ротации в ранний период вегетации культур они варьировали от 96 до 127 кг/га.

В отличие от 1-й и 2-й ротаций в 4-й ротации в посевах ряда культур максимум запасов $N-NH_4$ наблюдали уже в середине их вегетации. Поэтому оценку их запасов в зависимости от культуры и варианта применения удобрений проводили по средним величинам за 3 срока наблюдений в течение вегетации. В слое 0–40 см почвы в 17-ти ва-

риантах средние показатели запасов $N-NH_4$ под культурами варьировали от 50 до 57 кг/га, в среднем за 2014–2020 гг. они составили 54 кг/га.

Данные влияния систем удобрения на средние запасы аммонийного азота в слое 0–40 см почвы в 4-й ротации свидетельствовали о их небольшом увеличении с ростом доз как полного минерального удобрения, так и органических удобрений (табл. 7).

Таблица 7. Влияние удобрений на средние запасы N-NH₄ в слое 0–40 см почвы в течение вегетации культур (2014–2020 гг.), кг/га (контроль – 46 кг/га)

Доза навоза (действие), т/га	0	PK	NPK	2NPK	Средние (навоз)
0	49	48	53	56	52
40	50	54	55	63	56
60	53	49	55	62	55
80	55	56	58	61	58
Средние (минеральные удобрения)	52	52	55	60	

По действию на озимой пшенице и последствию на овсе органических удобрений выявлено более высокое накопление аммонийного азота в ранний срок вегетации культур, последующее снижение его за счет поглощения в середине вегетации (табл. 8). На озимой пшенице наибольшее снижение запасов N-NH₄ в середине вегетации установлено в вариантах применения двойной дозы полного минерального удобрения, ее сочетания с навозом. При применении одинарной дозы NPK происходило такое же интенсивное потребление N-NH₄ высокими урожаями возделываемых культур, как и в случае внесения двойной дозы NPK. Однако в последнем случае процессы трансформации почвенного азота в аммонийную форму были более интенсивными, чем при использовании одинарной дозы NPK. Для последующих после овса культур севооборота такого закономерного снижения запасов N-NH₄ в середине их вегетации по сравнению с ее началом не наблюдали. Более слабое поглощение аммонийного

азота культурами в 4-й ротации севооборота по сравнению с 1-й и 2-й ротациями было обусловлено снижением его запасов в слое 0–40 см в 3 раза и больше, а также уменьшением его перехода в жидкую фазу с 4.2–4.8 до 1.5–2.2% [13].

ВЫВОДЫ

1. Данные урожайности культур в 4-й ротации 7-польного зернотравяного севооборота свидетельствовали о решающем влиянии азота минеральных удобрений и навоза на их величину, подтвердили их определяющее влияние и на среднюю продуктивность севооборота. Средняя продуктивность севооборота при последствии известкования составила 34.8 ц з.е./га, в вариантах применения за севооборот N300P240K240 – 43.1, N515P480K480 – 45.3 ц з.е./га.

2. Установлены максимальные размеры коэффициента использования фотосинтетической активной радиации (ФАР) различными культурами севооборота. Для зерновых культур и викоовсяной смеси они были максимальными в благоприятные по увлажнению годы и варьировали от 3.0 до 3.8%. Для трав 1-го и 2-го года пользования (клевер + тимофеевка) они составляли соответственно 3.3 и 3.7%. Условия увлажнения являлись основным фактором, лимитирующим урожайность культур. Среднее ежегодное применение N40–45P40–45K40–45 в сочетании с внесением навоза КРС 40–80 т/га за севооборот было достаточным для использования 3.4–4.0% ФАР. Для эффективного использования двойной дозы NPK с теми же дозами органических удобрений в условиях Верхневолжья отмечен и недостаток ФАР.

3. Средняя величина эквивалента минеральных удобрений ЭМУ навоза для азота, рассчитан-

Таблица 8. Влияние действия и последствия органических и действия минеральных удобрений на снижение запасов аммонийного азота в слое 0–40 см почвы в середине вегетации озимой пшеницы и овса по сравнению с ее началом, кг/га

Вариант	Пшеница, 2015–2017 гг.	Овес, 2016–2018 гг.	Вариант	Пшеница, 2015–2017 гг.	Овес, 2016–2018 гг.
1	14.5	4.2	10	12.6	10.3
2	12.9	6.9	11	24.3	16.3
3	20.4	4.8	12	17.1	2.0
4	13.7	7.9	13	14.9	6.6
5	27.3	1.9	14	23.3	7.3
6	8.6	3.1	15	17.3	4.4
7	16.0	7.9	16	11.2	7.5
8	12.6	2.2	17	24.8	10.5
9	8.3	2.1	Среднее	16.5	6.2

ная из линейных взаимосвязей урожайности (продуктивности) культур севооборота с удобрениями, составила 0.78. Эта величина ЭМУ близка к эффективности его использования при применении одних органических удобрений в сравнении с одними минеральными азотными. При квадратичной взаимосвязи максимум роста продуктивности культур от минерального азота достигался при его дозе N54. По расчетам при такой же дозе азота органических удобрений величина ЭМУ при совместном использовании с NPK увеличивалась до 0.86. При средних ежегодных дозах навоза 5.7 (25 кг N/га), 8.6 (38 кг N/га) и 11.4 (50 кг N/га) т/га с соответствующими дозами азота минеральных удобрений ЭМУ навоза для азота составил соответственно 0.55, 0.65 и 0.79. Менее значительное влияние азота органических удобрений в повышении продуктивности севооборота подтвердило его ведущую роль в поддержании более высокого запаса гумуса в изученных почвах.

4. За счет благоприятных физико-химических свойств подпахотных горизонтов серых лесных почв Верхневолжья корневые системы возделываемых культур севооборота (однолетних трав, зерновых) из слоя 40–100 см почвы использовали до 50–66 мм влаги, травы 1-го года пользования за 2 укоса – до 90–104 мм. Это позволило уменьшить стрессовые нагрузки в засушливых условиях, когда пересыхал верхний гумусовый слой.

5. Запасы нитратного азота в слое 0–40 см почвы в ранний период вегетации культур, когда активно проходили процессы трансформации аммонийного азота внесенных минеральных удобрений в нитратную форму, азота почвы и органических удобрений – в аммонийную и нитратную формы в зависимости от систем удобрения и возделываемых культур варьировали от 23 до 224 кг/га. Без внесения минеральных азотных удобрений запасы N-NO₃ менялись от 23 до 73 кг/га. Под многолетними травами они были минимальными, под яровыми зерновыми – максимальными и в среднем за ротацию составляли 43–44 кг/га. При применении навоза в дозах 40–80 т/га за севооборот средние за ротацию запасы N-NO₃ возрастали до 46–60 кг/га, при их сочетании с РК-удобрениями – до 56–68 кг/га. Резкое увеличение запасов N-NO₃ происходило в вариантах внесения полного минерального удобрения и сочетания его с органическими (в среднем за ротацию от 96.6 до 162 кг/га). В середине вегетации культур (уборки однолетних трав и трав 2-го года пользования) запасы нитратного азота по сравнению с 1-м сроком наблюдения снижались в 2–4 раза. Наибольшие размеры их снижения (при поглощении растениями) выявлены в вариантах с применением пол-

ного минерального удобрения и сочетания его с органическими.

6. За ротацию 7-польного севооборота 1 кг азота органических удобрений в слое 0–40 см почвы повышал запасы нитратного азота на 0.40 кг, 1 кг N минеральных удобрений – на 1.30 кг N-NO₃. Формирование пула нитратного азота 1 кг азотных минеральных удобрений >1 кг соответствовало образованию экстра-азота. Наибольший его запас формировался при применении высоких доз минерального азота. Более низкая величина образования нитратного азота 1 кг азота органических удобрений, чем их величина ЭМУ для азота, свидетельствовала о накоплении нитратного азота при минерализации навоза в осенний период и его передвижении глубже 40 см весной в период снеготаяния.

7. В 4-й ротации севооборота по сравнению с концом 2-й ротации запасы аммонийного азота в слое 0–40 см почвы снизились со 174–201 до 46–60 кг/га, а его переход в жидкую фазу уменьшился с 4.2–4.8 до 1.5–2.5%. Это способствовало слабому влиянию этой формы азота на урожайность возделываемых культур. В ранний период вегетации культур при высокой влажности почвы и температуре воздуха происходила быстрая трансформация N-NH₄ минеральных удобрений в нитраты, а органического азота – в аммонийную и нитратную формы. Использование запасов последней формы азота оказало определяющее влияние на урожайность культур и продуктивность севооборота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ненайденко Г.Н.* Рациональное применение удобрений в условиях рыночной экономики. Иваново, 2007. 350 с.
2. *Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А.* Приемы комплексного использования средств химизации в севообороте на серых лесных почвах Верхневолжья в агротехнологиях различной интенсивности. Суздаль, 2017. 176 с.
3. Система ведения сельского хозяйства Владимирской области. Владимир: Изд-во ВАСХНИЛ НЗ РСФСР, 1983. 341 с.
4. Известкование кислых почв / Под ред. Авдониной Н.С., Петербургского А.В., Шедерова С.Г. М.: Колос, 1976. 304 с.
5. *Окорков В.В.* К теории химической мелиорации кислых почв // *Агрохимия*. № 9. 2019. С. 3–17.
6. *Сычев В.Г., Шафран С.А.* Агрохимические свойства почв и эффективность минеральных удобрений. М.: ВНИИА, 2013. 296 с.
7. *Лукин С.М.* Агроэкологическое обоснование системы применения удобрений в севооборотах на дерново-подзолистых супесчаных почвах: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2009. 49 с.

8. *Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А.* Удобрения и продуктивность севооборотов на серых лесных почвах Верхневолжья // *Агрохимия*. 2018. № 2. С. 56–70.
9. *Окорков В.В., Окоркова Л.А., Фенова О.А.* Удобрения и тренды в плодородии серых лесных почв Верхневолжья. Иваново: Верхневолжский ФАНЦ, 2018. 228 с.
10. *Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А.* Удобрения и модели их влияния на продуктивность и плодородие серых лесных почв Верхневолжья // *Владимир. земледелец*. 2019. № 2 (88). С. 4–11.
11. *Окорков В.В.* Модели продуктивности зернового севооборота на серых лесных почвах Верхневолжья // *Рос. сел.-хоз. наука*. 2018. № 1. С. 30–34.
12. *Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А.* Влияние удобрений на содержание подвижных форм азота и урожайность овса на серых лесных почвах Верхневолжья // *Агрохимия*. 2020. № 2. С. 3–13.
13. *Окорков В.В., Окоркова Л.А., Фенова О.А.* Влияние удобрений на содержание подвижных форм азота в почвах Верхневолжья // *Владимир. земледелец*. 2020. № 1 (91). С. 4–12.
14. *Ягодин Б.А., Дерюгин И.П., Жуков Ю.П.* Практикум по агрохимии / Под ред. Ягодина Б.А. М.: Агропромиздат, 1987. 512 с.
15. *Орлов Д.С., Лозановская И.Н., Попов П.Д.* Органическое вещество почв и органические удобрения. М.: Изд-во МГУ, 1985. 98 с.
16. *Попов П.Д., Хохлов В.И., Егоров А.А.* Органические удобрения: Справочник. М.: Агропромиздат, 1988. 207 с.
17. *Окорков В.В., Фенова О.А., Окоркова Л.А.* Агроклиматические ресурсы серых лесных почв Владимирского ополья и их использование // *Современные тенденции в научном обеспечении агропромышленного комплекса. Коллект. монограф.* / Под ред. Окоркова В.В. Иваново: ПресСто, 2020. С. 115–129.
18. *Сафонов А.Ф., Гатаулин А.М., Платонов И.Г.* Системы земледелия / Под ред. Сафонова А.Ф. М.: КолосС, 2009. 447 с.
19. *Окорков В.В., Окоркова Л.А., Фенова О.А., Семин И.В.* Использование местных органических удобрений на серых лесных почвах Владимирского ополья // *Агрохимия*. 2013. № 4. С. 34–47.

Use of Agroclimatic Potential of the Gray Forest Soils of the Upper Volga Region in the Application of Fertilizers

V. V. Okorkov^{a, #}, O. A. Fenova^a, and L. A. Okorkova^a

^a *The Upper Volga Federal Agricultural Research Center
p. Noviy, Suzdal district, Vladimir region 601261, Russia*

[#] *E-mail: okorkovvv@yandex.ru*

For the ongoing long-term stationary experiment on gray forest soils of the upper Volga region on the 4th rotation of the 7-field crop rotation, the results of studies of the effect of fertilizer systems on the yield of cultivated crops and crop rotation productivity are presented. New data on the effect of mineral and aftereffect of organic fertilizers on these parameters are obtained. The effect of fertilizers, which increases the productivity of crop rotation, was limited by the size of the use of moisture by crops, and sometimes by photosynthetic active radiation. For the first time, quantitative data on the effect of nitrogen of organic and mineral fertilizers on the accumulation of nitrate nitrogen in the early periods of vegetation of crops, their determining role in increasing their yield, are presented. They explain the higher role of nitrogen of organic fertilizers in comparison with mineral nitrogen in maintaining and improving the humus state of gray forest soils of the upper Volga region, the formation of extra nitrogen when using high doses of mineral fertilizers.

Key words: gray forest soils, upper Volga region, stationary field experience, organic and mineral fertilizers, yield, productivity, crop rotation.

УДК 631.81:631.559:631.582

ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЙ НА УРОЖАЙНОСТЬ КУЛЬТУР И ВЫНОС ПИТАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЗЕРНОПАРСИДЕРАЛЬНОМ СЕВООБОРОТЕ¹

© 2021 г. П. А. Постников^{1,*}, В. В. Попова¹

¹Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр Уральского отделения РАН
620142 Екатеринбург, ул. Белинского, 112-а, а/я 269, Россия

*E-mail: postnikov.ural@mail.ru

Поступила в редакцию 14.02.2020 г.

После доработки 06.10.2020 г.

Принята к публикации 11.01.2021 г.

В длительном опыте на темно-серой лесной тяжелосуглинистой почве в зернопаросидеральном севообороте (сидеральный пар—пшеница—овес—горох—ячмень) установлено, что запашка рапса в паровом поле на окультуренной почве даже без применения минеральных удобрений обеспечила получение урожайности яровых зерновых в среднем за ротацию севооборота на уровне 2.3–2.4 т/га. Органо-минеральные фоны питания способствовали дополнительному сбору зерна на уровне 0.58–1.37 т/га. Увеличение урожайности выращиваемых культур в севообороте при применении минеральных и органических удобрений и повышении содержания макроэлементов в растительной продукции существенно увеличили общий вынос элементов питания урожаем по сравнению с органическим фоном питания. При возделывании современных сортов зерновых и зернобобовых культур с более высокой потенциальной урожайностью выявлено снижение хозяйственного выноса макроэлементов на единицу продукции по сравнению с нормативными показателями.

Ключевые слова: севооборот, минеральные и органические удобрения, сидерат, азот, фосфор, калий, урожайность, вынос элементов питания.

DOI: 10.31857/S000218812104013X

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшей целью продовольственной безопасности РФ является надежное обеспечение населения в достаточном количестве качественной сельскохозяйственной продукцией. Большое значение придается производству продовольственного и фуражного зерна. В условиях Свердловской обл. зерновые и зернобобовые культуры в структуре посевных площадей занимают ≈43% [1], при этом урожайность зерновых культур за 2016–2018 гг. составила в среднем ≈2.0 т/га. Дальнейшее повышение сбора зерна должно осуществляться через освоение севооборотов по типу плодосмена и внедрения приемов биологизации земледелия [2–5].

Для получения стабильных урожаев зерновых культур в севооборотах необходимо определить рациональные системы удобрения, которые бы учитывали почвенно-климатические условия и биологические особенности сельскохозяйственных культур. В современной земледелии, когда объемы применения минеральных и органических удобрений существенно снизились, важно уточнить нормативные показатели выноса питательных элементов урожаем культур. В полевых опытах подтверждено [6–9], что с появлением новых сортов зерновых культур, обладающих более высокой потенциальной урожайностью, показатели выноса на 1 т продукции в настоящее время отличаются от нормативных данных. Поэтому дальнейшие исследования должны быть направлены на получение новой информации и обобщение материала для разработки нормативной базы для расчета доз удобрения на планируемый урожай. При этом заметную роль играет Географическая сеть опытов с удобрениями, где обобщают опытные данные из различных почвенно-климатических зон РФ [10].

¹ Исследование выполнено в Уральском научно-исследовательском институте сельского хозяйства – филиале УрФНИЦ УрО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования по направлению 142 Программы ФНИ государственных академий наук по теме “Усовершенствовать систему адаптивно-ландшафтного земледелия для Уральского региона и создать агротехнологии нового поколения на основе минимализации обработки почвы, диверсификации севооборотов, интегрированной защиты растений, биологизации, сохранения и повышения почвенного плодородия”.

Цель работы – выявить воздействие минеральных и органических удобрений на урожайность сельскохозяйственных культур и вынос питательных элементов основной и побочной продукцией в зернопаросидеральном севообороте.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

С 2001 г. в стационарном длительном опыте изучают полевые севообороты с максимальной ориентацией на биологические факторы. В 3-й ротации зернопаросидеральный севооборот был заложён по следующей схеме: сидеральный пар (рапс)–пшеница–овес–горох–ячмень. Чередование культур за ротацию осуществлялось во времени и пространстве.

Почва опытного участка – типичная темно-серая лесная тяжелосуглинистая со следующими агрохимическими показателями в пахотном слое: содержание гумуса (по Тюрину) – 4.84–5.07%, легкогидролизуемого азота (по Корнфильду) – 146–168 мг/кг почвы, подвижного фосфора – 206–248 мг/кг почвы и калия (по Кирсанову в модификации ЦИНАО) – 138–172 мг/кг почвы, сумма поглощенных оснований (по Каппену) – 31.1–32.5 ммоль/100 г почвы, pH_{KCl} (по методу ЦИНАО) – 4.97–5.09.

Схема опыта в севообороте включала 3 фона питания: 1 – органический (без минеральных удобрений) с заправкой зеленой массы рапса в паровом поле, 2 – органо-минеральный с применением умеренных доз минеральных удобрений из расчета на 1 га севооборотной площади N30P30K36 + сидерат, 3 – органо-минеральный с использованием сидерата, соломы (гороха, ячменя) на фоне минеральных удобрений N24P24K24.

В качестве удобрения использовали АЗФК с содержанием каждого элемента по 15% д.в. На 3-м фоне питания дозу минеральных удобрений корректировали с учетом поступления азота, фосфора и калия с сидератом и соломой. В среднем за ротацию севооборота на обоих фонах питания с минеральными и органическими удобрениями на 1 га пашни поступило 140 кг NPK, из них на 2-м фоне с сидератом – N22, в третьем с сидератами, соломой – N28. Из-за большего поступления калия с соломой для выравнивания соотношения элементов питания на 2-м фоне питания дополнительно вносили хлористый калий в дозе K30. Минеральные удобрения перед посевом врезали в почву сеялкой СН-16. В паровом поле зеленую массу рапса запахивали на сидерат, в среднем за 2011–2015 гг. его урожайность в зависимости от удобренности почвы варьировала от 13.4 до 23.4 т/га. Из фактического урожая культур вносили солому гороха – в среднем за ротацию ≈2.5 и ячменя – 3.9 т/га.

Агротехника возделывания сельскохозяйственных культур в севообороте общепринятая для Среднего Урала. Объектами исследования были следующие районированные сорта культур: яровой рапс – Луч, яровая пшеница – Красноуфимская 100, овес – Стайер, горох – Красноуфимский 11, яровой ячмень – Сонет [11].

Для определения содержания питательных элементов в зерне и соломе при учете урожая с делянок отобраны растительные пробы. Химические анализы выполнены в аналитической лаборатории по стандартным методикам: азот общий (ГОСТ 32044.1-2012), P_2O_5 (ГОСТ 266657-97), K_2O (ГОСТ 30504-97).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Возделывание рапса в паровом поле на окультуренной темно-серой почве даже без применения минеральных удобрений обеспечило формирование зеленой массы >10 т/га, при внесении их умеренных доз урожайность крестоцветной культуры возросла в 1.6–1.7 раза по отношению к органическому фону питания (табл. 1).

Из всех изученных зерновых культур за ротацию севооборота наибольшая урожайность была у яровой пшеницы, данная закономерность отмечена при всех системах удобрения. Заправка зеленой массы рапса в паровом поле способствовала поступлению с 1 т ≈4.8 кг азота (N), фосфора (P_2O_5) – 1.3 и калия (K_2O) – 5.1 кг. Обогащение пахотного слоя свежей органической массой и легкодоступными питательными элементами обеспечило улучшение питательного режима темно-серой почвы, в первую очередь – увеличение содержания минерального азота [1]. Благодаря повышению доступности элементов питания в почве, проявилась высокая эффективность сидерального пара как предшественника.

В последствии на овсе была получена достаточно высокая урожайность зернофуражной культуры, достоверных различий в урожайности по отношению к пшенице на органо-минеральных фонах питания не выявлено.

Из-за биологических особенностей горох обеспечил наименьший сбор зерна как при внесении сидерата, так и его сочетания с минеральными удобрениями. Анализ урожайных данных ячменя показал, что зернобобовая культура по воздействию как предшественник практически не уступала сидеральному пару, а при органо-минеральных системах удобрения – повышала сбор зерна ячменя на 0.08–0.21 т/га.

В целом уровень урожайности сельскохозяйственных культур за ротацию севооборота во многом зависел от погодных условий и примене-

Таблица 1. Продуктивность культур севооборота в зависимости от систем удобрения (средние за 2011–2015 гг.), т/га

Фон питания	Культуры					Суммарная продуктивность	
	рапс	пшеница	овес	горох	ячмень	всего	на 1 га
Органический (сидерат)	13.4	<u>2.38</u>	<u>2.34</u>	<u>1.78</u>	<u>2.29</u>	<u>8.79*</u>	<u>1.76</u>
		3.21	2.75	1.75	2.43	10.1	2.02
Органо-минеральный (N30P30K36 + сидерат)	23.4	<u>3.58</u>	<u>3.44</u>	<u>2.36</u>	<u>3.66</u>	<u>13.0</u>	<u>2.60</u>
		4.87	4.04	2.67	3.78	15.3	3.06
Органо-минеральный (N24P24K24 + сидерат + солома)	21.0	<u>3.56</u>	<u>3.36</u>	<u>2.58</u>	<u>3.77</u>	<u>13.3</u>	<u>2.65</u>
		4.83	3.96	2.51	3.89	15.3	3.06
<i>HCP</i> ₀₅ культура	–		<u>0.37</u>			–	–
			0.48				
<i>HCP</i> ₀₅ удобрения	–		<u>0.32</u>			–	–
			0.41				

Примечание. Над чертой – урожайность основной продукции, под чертой – побочной (соломы). То же в табл. 2–4.

*Суммарный сбор зерна и соломы за ротацию севооборота.

ния удобрений. Дисперсионный анализ урожайных данных показал, что на долю погоды приходилось 31% влияния, на удобрения – 29, на другие факторы – 30%. Из всех лет наблюдений максимальный сбор зерна отмечен в умеренно-влажных условиях в 2011 г., наименьший – при засухе в 2012 г., избыточно влажные годы по урожайности зерновых и зернобобовых занимали промежуточное положение.

При сочетании минеральных удобрений с сидератом и соломой дополнительный сбор зерна по отношению к органическому фону питания варьировал в пределах от 0.58 до 1.48 т/га. По отдаче от минеральных и органических удобрений культуры севооборота по мере убывания можно расположить в следующем порядке: ячмень > > пшеница > овес > горох.

При сочетании минеральных и органических удобрений (N24P24K24 + сидерат + солома), несмотря на уменьшение дозы удобрений и внесение соломы во 2-й ротации, в 3-й ротации севооборота не выявлено снижения урожайности зерновых культур. Это свидетельствовало о том, что в короткоротационных севооборотах при запашке сидерата в паровом поле и поступлении биологического азота с зернобобовой культурой появлялась возможность снижения доз минеральных удобрений, что важно в плане ресурсосбережения в земледелии.

Сбор побочной продукции во многом зависел от величины урожайности культуры и соотношения между соломой и зерном. Усредненные данные за ротацию зернопаросидерального севооборота свидетельствовали, что у ячменя и гороха соотношение между соломой и зерном в

зависимости от условий увлажнения варьировало от 0.8 до 1.1, минимальным оно было при засухе 2012 г. Для пшеницы и овса соотношение между соломой и зерном было шире, в среднем 1.16–1.2, благодаря этому у данных культур достигнут наибольший сбор побочной продукции.

Усредненные данные химического состава зерна показали, что максимальное содержание азота отмечено в горохе, яровые зерновые по этому показателю существенно уступали зернобобовой культуре (табл. 2). В зерне яровой пшеницы накопление N существенно превышало ячмень и овес.

При сочетании минеральных и органических удобрений выявлено увеличение содержания азота в основной продукции по отношению к органическому фону питания. Применение удобрений в дозе N30P30K36 достоверно увеличивало накопление N в зерне пшеницы и ячменя. При снижении дозы минеральных удобрений отмечено уменьшение содержания общего азота.

В процессе формирования и налива зерна происходит перераспределение азота в растении, основная его часть остается в зерновой продукции. По химическому составу наиболее богата азотом солома гороха, наименьшее его содержание – в овсе. При использовании органических и минеральных удобрений существенно возрастало накопление N в соломе культур по отношению к органическому фону питания.

При применении сидерата накопление фосфора в зерне яровых зерновых культур в меньшей степени зависело от их биологических особенностей, было несколько меньше в зерне овса. При сочетании органических и минеральных удобрений выявлено повышение содержания

Таблица 2. Содержание азота, фосфора и калия в основной и побочной продукции (2011–2015 гг.), % на сухое вещество

Фон питания	Культуры				
	рапс	пшеница	овес	горох	ячмень
N					
Сидерат	2.25	<u>2.23</u> 0.54	<u>1.89</u> 0.40	<u>3.63</u> 0.89	<u>1.79</u> 0.59
N30P30K36 + сидерат	2.68	<u>2.54</u> 0.64	<u>2.09</u> 0.52	<u>3.80</u> 1.09	<u>2.02</u> 0.76
N24P24K24 + + сидерат + солома	2.62	<u>2.41</u> 0.67	<u>2.04</u> 0.48	<u>3.73</u> 1.04	<u>1.96</u> 0.68
HCP ₀₅ культура			<u>0.28</u> 0.10		
HCP ₀₅ удобрения			<u>0.22</u> 0.09		
P ₂ O ₅					
Сидерат	0.70	<u>1.03</u> 0.18	<u>0.92</u> 0.36	<u>1.01</u> 0.28	<u>1.01</u> 0.32
N30P30K36 + сидерат	0.88	<u>1.10</u> 0.27	<u>1.02</u> 0.38	<u>1.16</u> 0.32	<u>1.07</u> 0.39
N24P24K24 + + сидерат + солома	0.80	<u>1.06</u> 0.28	<u>0.99</u> 0.38	<u>1.22</u> 0.29	<u>1.04</u> 0.35
HCP ₀₅ культура			<u>0.09</u> 0.07		
HCP ₀₅ удобрения			<u>0.07</u> 0.06		
K ₂ O					
Сидерат	2.67	<u>0.58</u> 0.91	<u>0.53</u> 1.40	<u>0.94</u> 0.84	<u>0.66</u> 0.99
N30P30K36 + сидерат	3.10	<u>0.61</u> 1.18	<u>0.62</u> 1.62	<u>1.04</u> 1.00	<u>0.72</u> 1.26
N24P24K24 + + сидерат + солома	2.98	<u>0.61</u> 1.08	<u>0.58</u> 1.63	<u>1.04</u> 0.96	<u>0.72</u> 1.18
HCP ₀₅ культура			<u>0.23</u> 0.25		
HCP ₀₅ удобрения			<u>0.18</u> 0.20		

P₂O₅ в основной продукции, при этом достоверно возросло накопление данного элемента только в зерне гороха и овса. Независимо от фона питания меньше содержалось фосфора в соломе яровой пшеницы, больше – в побочной продукции овса и ячменя. Следует отметить, что применение минеральных удобрений существенно увеличило

содержание данного элемента питания в соломе пшеницы, для других культур различия между удобренными вариантами находились в пределах наименьшей существенной разницы.

В отличие от других макроэлементов наибольшее накопление K₂O отмечено в соломе. По химическому составу наиболее богата калием солома овса, меньше всего – гороха. Наибольшее содержание калия в зерне отмечено у гороха, для других культур достоверных различий не выявлено. Внесение минеральных удобрений в дозе N30P30K36 достоверно увеличивало содержание K₂O в соломе яровых зерновых культур в отличие от гороха. На органо-минеральных фонах питания отмечено увеличение накопления калия в соломе овса и ячменя, в то же время содержание калия в основной продукции пшеницы и ячменя при этих системах удобрения практически не отличалось от органической системы.

При обобщении данных выноса макроэлементов урожаем крестоцветной культуры выявлено, что при использовании минеральных удобрений с увеличением сбора зеленой массы рапса вынос азота увеличился на 37.0–43.7 кг, калия – 39.1–49.3, фосфора – 11.0–14.3 кг/га по сравнению с естественным фоном плодородия темно-серой почвы (табл. 3). Поступление такого количества элементов питания в паровом поле при запашке сидерата способствовало получению достаточно высокой урожайности зерновых культур в течение 2-х лет, о чем говорилось выше.

Усредненные данные за ротацию севооборота показали, что вынос питательных элементов из почвы и удобрений зависел от культуры, величина урожая основной и побочной продукции и их химического состава. В варианте с запашкой сидерата наибольший вынос азота зерном отмечен для гороха, между яровыми зерновыми культурами существенных различий не выявлено. С соломой максимальный вынос N выявлен для пшеницы, наименьший – для овса. На органо-минеральных фонах питания отчуждение азота основной продукцией увеличилось на 21.0–37.7 кг, с соломой – на 9.3–13.7 кг/га по отношению к органическому фону.

Из всех изученных культур в севообороте при органической системе удобрения наименьший вынос фосфора с зерном отмечен у ячменя, солома зернобобовой культуры данный элемент питания выносила меньше по сравнению с яровыми зерновыми. По отношению к органическому фону питания сочетание минеральных и органических удобрений увеличило отчуждение P₂O₅ соломой овса и пшеницы на 4.2–7.0 кг/га.

Из-за невысокого содержания калия в зерне вынос данного макроэлемента при запашке сиде-

Таблица 3. Вынос элементов питания урожаем культур в севообороте в зависимости от систем удобрения (2011–2015 гг.), кг/га

Фон питания	Культура					Вынос за ротацию	
	рапс	пшеница	овес	горох	ячмень	всего	на 1 га
N							
Сидерат	41.7	<u>39.7</u> 14.3	<u>37.2</u> 8.96	<u>54.0</u> 12.6	<u>35.3</u> 11.5	<u>166*</u> 47.4	<u>33.2</u> 9.5
N30P30K36 + сидерат	85.4	<u>77.4</u> 26.1	<u>61.9</u> 17.4	<u>76.6</u> 24.3	<u>62.8</u> 22.6	<u>279</u> 89.9	<u>55.7</u> 18.0
N24P24K24 + сидерат + солома	78.7	<u>74.3</u> 27.0	<u>58.2</u> 15.5	<u>82.0</u> 22.1	<u>62.6</u> 20.8	<u>277</u> 42.5*	<u>55.4</u> 8.5
<i>HCP</i> ₀₅ культура	8.6 4.0						
<i>HCP</i> ₀₅ удобрения	6.7 3.5						
P₂O₅							
Сидерат	13.0	<u>20.9</u> 6.29	<u>18.1</u> 8.57	<u>20.0</u> 4.10	<u>13.0</u> 6.42	<u>72.0</u> 24.8	<u>14.4</u> 4.90
N30P30K36 + сидерат	27.3	<u>33.4</u> 10.8	<u>30.2</u> 12.8	<u>23.4</u> 7.12	<u>33.8</u> 13.2	<u>121</u> 43.8	<u>24.2</u> 8.81
N24P24K24 + сидерат + солома	24.0	<u>32.3</u> 10.9	<u>28.7</u> 15.6	<u>26.5</u> 6.23	<u>33.9</u> 11.2	<u>121</u> 26.5	<u>24.2</u> 5.30
<i>HCP</i> ₀₅ культура	3.6 3.0						
<i>HCP</i> ₀₅ удобрения	2.8 2.6						
K₂O							
Сидерат	49.3	<u>11.9</u> 18.6	<u>10.7</u> 28.1	<u>14.2</u> 12.8	<u>13.0</u> 19.5	<u>49.8</u> 79.0	<u>9.96</u> 15.8
N30P30K36 + сидерат	98.7	<u>19.0</u> 32.4	<u>18.5</u> 48.0	<u>23.2</u> 20.3	<u>22.7</u> 39.6	<u>83.4</u> 140	<u>16.7</u> 28.0
N24P24K24 + сидерат + солома	88.4	<u>18.2</u> 32.9	<u>17.2</u> 49.6	<u>24.1</u> 20.1	<u>23.1</u> 40.5	<u>82.6</u> 82.5	<u>16.5</u> 16.5
<i>HCP</i> ₀₅ культура	5.2 10						
<i>HCP</i> ₀₅ удобрения	4.0 8.9						

*Без учета рапса, запаханного на сидерат, и соломы гороха, ячменя, использованной на удобрение.

рата не превышал 15 кг/га, более высокий вынос калия отмечен у гороха и ячменя. Вынос K₂O побочной продукцией был больше у овса, наименьший – у гороха из-за его низкой продуктивности по сравнению с яровыми зерновыми. Аналогичные закономерности выявлены на органо-минеральных фонах питания.

Независимо от уровня минерального питания суммарный вынос азота основной продукцией на

1 га севооборотной площади увеличился на 22.2–22.5, фосфора – на 9.8, калия – на ≈6.7 кг/га. В то же время отчуждение макроэлементов соломой в варианте N24P24K24 + сидерат + солома за счет запашки побочной продукции практически сравнялось с органической системой удобрения.

Одним из критериев расчета доз минеральных удобрений на планируемый урожай является общий вынос питательных элементов 1 т основной продукции. На органическом фоне питания

Таблица 4. Хозяйственный вынос элементов питания 1 т основной продукции (2011–2015 гг.), кг

Фон питания	Культуры				
	рапс	пшеница	овес	горох	ячмень
N					
Сидерат	3.6	27.6	22.9	46.9	20.0
N30P30K36 + сидерат	3.9	31.8	26.1	51.8	23.4
N24P24K24 + + сидерат + солома	4.2	30.8	25.2	50.6	22.4
P ₂ O ₅					
Сидерат	1.1	12.6	12.7	13.0	10.9
N30P30K36 + сидерат	1.3	13.7	14.0	14.7	12.3
N24P24K24 + + сидерат + солома	1.2	13.3	13.8	15.3	11.7
K ₂ O					
Сидерат	4.2	14.9	19.6	23.2	14.9
N30P30K36 + сидерат	4.6	17.2	22.4	25.6	17.9
N24P24K24 + + сидерат + солома	4.5	16.9	22.1	24.7	17.7

(без минеральных удобрений) вынос азота 1 т зерна в зависимости от выращиваемых культур в севообороте варьировал в широких пределах, максимальный показатель отмечен у гороха, наименьший – у ячменя, пшеница и овес занимали промежуточное положение (табл. 4). В этом случае необходимо учитывать, что значительная часть азота накапливается растениями гороха за счет симбиоза с клубеньковыми бактериями. Экспериментальными данными установлено, что для однолетних зернобобовых культур коэффициент азотфиксации равняется 0.55 [12].

В вариантах с применением доз минеральных удобрений N24–30P24–30K30–36 в сочетании с органическими вынос азота яровыми зерновыми культурами возрос на 2.3–4.2 кг/т по отношению к органическому фону питания. В выносе P₂O₅ урожаем не выявлено заметных изменений между культурами, несколько больше данный показатель был у гороха. Органо-минеральные системы удобрения не приводили к существенному увеличению удельного расхода фосфора на единицу урожая, изменения находились в интервале от 0.7 до 2.3 кг/т, наибольшая разница отмечена для зернобобовой культуры. По мнению авторов работы [13], на почвах с высокой обеспеченностью подвижным фосфором расход P₂O₅ на 1 т основной продукции с учетом побочной мало зависел от предшественника и доз азотных удобрений.

По усредненным данным, за ротацию севооборота установлено, что удельный расход калия на 1 т зерна варьировал в довольно широком диапазоне: от 14.9 кг (в варианте с запашкой сидерата) до 25.6 кг при сочетании органических и минеральных удобрений. По общему выносу K₂O на единицу продукции выращиваемые культуры в севообороте в порядке убывания можно расположить в следующий ряд: горох > овес > ячмень > > пшеница.

Сравнивая полученные данные удельного выноса калия на 1 т зерна с соответствующим количеством соломы с нормативными показателями [14–16], можно отметить, что для гороха и овса они оказались близкими. В то же время у современных сортов пшеницы и ячменя расход элементов питания на единицу урожая заметно меньше. При расчетах доз минеральных удобрений рекомендуются затраты фосфора на уровне 10–12 кг/т, по обобщенным данным за ротацию таким показателям соответствовал только ячмень, для пшеницы и овса они были больше на 2.6–5.4 кг по сравнению с принятыми нормативами в Уральском регионе. В то же время при выращивании интенсивных сортов ячменя с потенциальной урожайностью 6.0–7.0 т/га и больше выявлено снижение удельного расхода азота на единицу продукции, аналогичная закономерность отмечена для гороха с появлением сортов усатой формы.

ВЫВОДЫ

1. На окультуренной темно-серой тяжелосуглинистой почве при запашке сидерата в паровом поле возможно получение урожайности яровых зерновых культур на уровне 2.3–2.4 т/га даже без применения минеральных удобрений. Сочетание умеренных доз минеральных удобрений с органическими обеспечило дополнительный сбор зерна зерновых и зернобобовых в пределах от 0.58 до 1.37 т/га. Из всех выращиваемых культур в севообороте наибольшей отзывчивостью на внесение удобрений выделялся ячмень.

2. На органо-минеральных фонах питания удельный вынос азота и фосфора выращиваемыми культурами в зернопаросидеральном севообороте 1 т зерна с соответствующим количеством соломы практически равнялся нормативным показателям, рекомендуемым для зоны Урала и других регионов Нечерноземной полосы РФ. В то же время интенсивный сорт ячменя Сонет с более высокой потенциальной продуктивностью имел более низкий удельный вынос N и K₂O на единицу продукции, аналогичная тенденция к снижению расхода калия отмечена для яровой пшеницы.

3. Мониторинг выноса питательных элементов урожаем сельскохозяйственных культур в стационарном длительном опыте позволил уточнить их нормативные показатели для расчета доз минеральных удобрений с учетом изменения агрохимических показателей пахотных земель и подбора новых сортов, более адаптированных к почвенно-климатическим условиям Уральского региона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зезин Н.Н., Постников П.А., Колотов А.П.* Научно обоснованная зональная система земледелия Свердловской области. Екатеринбург: Изд-во ООО "Джи Лайм", 2019. 371 с.
2. *Лошаков В.Г.* Севооборот и плодородие почвы / Под ред. Сычева В.Г. М.: ВНИИА, 2012. 512 с.
3. *Постников П.А.* Продуктивность севооборотов при использовании приемов биологизации // Аграрн. вестн. Урала. 2015. № 6. С. 20–23.
4. *Новоселов С.И.* Влияние севооборота и удобрений на урожайность сельскохозяйственных культур и плодородие почвы // Вестн. МарийГУ. Сер. Сел.-хоз. науки. Эконом. науки. 2017. Т. 3. № 1(9). С. 60–64.
5. *Тиранова Л.В., Тиранов А.Б.* Альтернативные органические удобрения в короткороотационных севооборотах // Земледелие. 2011. № 5. С. 15–17.
6. *Хачидзе А.С., Мамедов М.Г.* Влияние сортовых особенностей и технологии выращивания зерновых культур на вынос питательных веществ и окупаемость удобрений // Агрохимия. 2009. № 5. С. 42–48.
7. *Варламов В.А., Алиев А.М., Ваулин А.В., Кирпичников Н.А., Ваулина Г.И.* Вынос NPK пшеницей и ячменем на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве ЦРНЗ РФ // Плодородие. 2012. № 2. С. 12–14.
8. *Каренгина Л.Б., Байкин Ю.Л.* Эффективность различных фонов питания при возделывании зерновых культур // Аграрн. вестн. Урала. 2017. № 1(155). С. 21–25.
9. *Окороков В.В., Фенова О.А., Окорокова Л.А.* Оптимизация доз, вынос и использование элементов питания при длительном применении удобрений // Усп. совр. естествознания. 2019. № 5. С. 19–29.
10. *Сычев В.Г., Листова М.П., Беличенко М.В., Романенков В.А., Никитина Л.В., Чистотин М.В.* Совершенствование программ агрохимических исследований в Географической сети опытов с удобрениями // Бюл. Географ. сети опытов с удобр. Вып. 22. М.: ВНИИА, 2016. 44 с.
11. *Зезин Н.Н., Шанин А.А., Мальцев Н.В.* Руководство по проведению полевых работ в сельскохозяйственных предприятиях Свердловской области в 2013 году. Екатеринбург: УралНИИСХ РАСХН, 2013. 80 с.
12. *Треначев Е.П.* Агрохимические аспекты биологического азота в современной земледелии. М.: Агроконсалт, 1999. 531 с.
13. *Конончук В.В., Гончаренко М.С.* К вопросу о расчете доз удобрений на планируемый урожай зерновых культур в Центральном Нечерноземье // Зерн. хозяйство России. 2012. № 4. С. 50–54.
14. Нормативы выноса и коэффициентов использования питательных веществ сельскохозяйственными культурами из минеральных удобрений и почвы. М.: ЦИНАО, 1989. 110 с.
15. Справочник агронома Нечерноземной полосы / Под ред. Гуляева Г.В. 3-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1990. 575 с.
16. *Чесноков Н.А., Гусак С.И., Иванов Н.А.* Применение удобрений в Свердловской области. Свердловск: УралНИИСХ, 1991. 139 с.

Influence of Fertilizers on Crop Yield and Removal of Nutrient Elements in Grain-Steep-Sideral Crop Rotation

P. A. Postnikov^{a, #} and V. V. Popova^a

^a Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre, Ural Branch of the Russian Academy of Science
ul. Belinskogo 112-a, p.o. box 269, Yekaterinburg 620142, Russia

[#] E-mail: postnikov.ural@mail.ru

In a long-term experiment on dark gray forest heavy loamy soil in grain-steep-sideral crop rotation (sideral steep, wheat, oats, peas, barley), it was found that plowing rapeseed in a fallow field on cultivated soil, even without the use of mineral fertilizers, provided an average yield of spring cereals per rotation crop rotation at the level of 2.3–2.4 t/ha. Organo-mineral nutrition backgrounds contributed to additional grain harvesting at the level of 0.58–1.37 t/ha. An increase in the yield of cultivated crops in a crop rotation with the use of mineral and organic fertilizers and an increase in the content of macronutrients in plant products significantly increased the total removal of nutrients with the crop compared to the organic background of nutrition. When cultivating modern varieties of grain and leguminous crops with a higher potential yield, a decrease in the economic removal of macroelements per unit of production was revealed in comparison with the standard indicators.

Key words: crop rotation, mineral and organic fertilizers, siderate, nitrogen, phosphorus, potassium, yield, removal of nutrient elements.

УДК 631.81:631.445.24:631.416:632.122.1:633.14

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ПЛОДОРОДИЕ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЫ, СОДЕРЖАНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПИТАНИЯ И ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ОЗИМОЙ РЖИ

© 2021 г. Н. Е. Завьялова^{1,*}, М. Т. Васбиева¹, Д. Г. Шишков¹

¹Пермский научно-исследовательский институт сельского хозяйства ПФИЦ УрО РАН
614532 Пермский край, с. Лобаново, ул. Культуры 12, Россия

*E-mail: nezavyalova@gmail.com

Поступила в редакцию 13.03.2020 г.

После доработки 24.11.2020 г.

Принята к публикации 11.01.2021 г.

Изучено влияние длительного систематического применения (40 лет) возрастающих доз минеральных удобрений на показатели плодородия почвы. Показано сохранение исходного содержания органического углерода, увеличение содержания подвижного фосфора и обменного калия в 1.3–3.1 раза. Отмечено существенное подкисление почвы. Максимальные изменения наблюдали при дозе НРК150. Рассмотрено распределение содержания азота, фосфора и калия в растениях озимой ржи (корнях, надземной массе, зерне). Изучено влияние минеральных удобрений на содержание в почве подвижных форм тяжелых металлов (вытяжка 1н. НС1 и ААБ рН 4.8) и проведена оценка их поступления в растения в разных фазах развития озимой ржи (кущение, колошение, полная спелость).

Ключевые слова: длительный стационарный опыт, агрохимические свойства почвы, тяжелые металлы.

DOI: 10.31857/S0002188121040153

ВВЕДЕНИЕ

Изучение реакции растений на удобрения является важнейшим вопросом агрохимии. Минеральное питание имеет принципиальное значение при оценке и управлении параметрами эффективного плодородия и продукционного процесса сельскохозяйственных культур в агроэкосистемах. Сбалансированное минеральное питание – это основа формирования высоких урожаев сельскохозяйственных культур. Удобрения стимулируют все обменные процессы в растениях на всех этапах их роста и развития [1].

Основную площадь пашни Пермского края занимают дерново-подзолистые почвы. Высокая и стабильная продуктивность дерново-подзолистых почв, отличающихся низким естественным плодородием, в условиях короткого вегетационного периода и дефицита тепла возможна при систематическом научно обоснованном применении агрохимических средств [2]. По данным [3], среди основных факторов повышения урожайности (сорт, средства защиты растений и др.) на долю минеральных удобрений приходится 40% прироста производства продовольствия. Потребление минеральных удобрений в мире в 2016 г. достигло 197.5 млн т. Резкое уменьшение объемов

применения удобрений в последние 20 лет в России в целом и в Пермском крае в частности привело к формированию отрицательного баланса питательных веществ в почве, что способствовало снижению урожайности и качества сельскохозяйственных культур. На сегодняшний день в Российской Федерации объемы внесения минеральных удобрений уступают среднемировым показателям (≈ 100 кг д.в./га) почти в 5 раз [3]. Насыщенность пашни в Пермском крае минеральными удобрениями в последние годы составила 10–14 кг д.в./га, органическими – 0.9–1.4 т/га. Согласно данным центра агрохимической службы, на конец 2019 г. 84% пахотных земель в Пермском крае относятся к категории низкой и очень низкой обеспеченности гумусом, 79% составляют кислые почвы, 34 и 14% относятся к почвам с низким содержанием подвижного фосфора и калия.

Органические и минеральные удобрения в своем составе кроме основных элементов питания содержат примеси, которые могут загрязнять почву и отрицательно влиять на развитие растений. К таким токсичным примесям причисляют тяжелые металлы (ТМ). Наиболее потенциально опасными как по набору, так и по концентрации ТМ являются фосфорсодержащие удобрения [3–

5]. Минеральные удобрения оказывают косвенное влияние на содержание ТМ — через подкисление почвы в результате их применения [6, 7]. В других работах [8–11] установлено, что внесение минеральных удобрений не влияло на содержание подвижных форм ТМ в пахотном слое почвы и их накопление в растениях. Почвы являются природными накопителями ТМ в окружающей среде и основным источником загрязнения сопредельных сред, включая растения [12]. Растениям доступны элементы, присутствующие в почве в водорастворимой и обменной форме. Накопление ТМ в растениях зависит от природно-климатических условий произрастания, биологических особенностей, а также технологии возделывания сельскохозяйственной культуры и даже от сорта [4, 13]. В репродуктивных органах, как правило, элементы-загрязнители накапливаются, значительно меньше, чем в вегетативных. Корнеплоды, клубни, плоды содержат значительно меньше ТМ, чем листья и стебли [14]. В настоящее время повышается научный интерес к вопросам безопасности применения удобрений, мелиорантов, средств защиты растений с точки зрения сохранения “здоровья” почвы и получения экологически чистой сельскохозяйственной продукции.

Цель работы — изучение влияния возрастающих доз НРК на показатели плодородия дерново-подзолистой почвы и распределение содержания основных элементов питания и тяжелых металлов в растениях озимой ржи в разных фазах развития.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Полевой стационарный опыт по изучению влияния различных доз минеральных удобрений на урожайность полевых культур заложен в 2-х последовательных во времени закладках в 1978–1980 гг. на опытном поле Пермского НИИСХ ПФИЦ УрО РАН на дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве со следующими характеристиками (слой 0–20 см): pH_{KCl} 5.6, гидролитическая кислотность — 2.0, обменная — 0.025, сумма поглощенных оснований — 21.0 мг-экв/100 г почвы, содержание гумуса по Тюрину — 2.12%, подвижных форм фосфора в пахотном слое — 175, обменного калия — 203 мг/кг почвы (по Кирсанову). Схема опыта, варианты: внесение N0P0K0, N60P60K60, N90P90K90, N150P150K150. Минеральные удобрения вносили под зерновые культуры и картофель, на клевере изучали последствие. В опыте использовали N_{aa} , P_{cd} и K_x . Известь вносили перед закладкой опыта в дозе по 1.0 H_r .

Органические удобрения в опыте не использовали. Севооборот — 8-польный со следующим чередованием культур: чистый пар, озимая рожь, картофель, пшеница, клевер 1-го года пользования, клевер 2-го года пользования, ячмень, овес. Общая площадь делянки 120 м², учетная 76.4 м². Размещение вариантов рендомизированное. За время проведения опыта было внесено удобрений при дозе N60P60K60 — по 1560 кг д.в., при дозе N90P90K90 — по 2340 кг д.в. и при дозе N150P150K150 — по 3900 кг д.в. НРК/га.

Почвенные образцы для исследования отбирали в начале 6-й ротации севооборота в вегетационный период озимой ржи (сорт Фаленская 4) в слое 0–20 см. Агрохимические свойства почвы изучали с использованием следующих методов: содержание органического вещества — по Тюрину в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26213-91), подвижный фосфор и калий — по Кирсанову в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26207-91), аммиачный азот — фотометрическим методом (ГОСТ 26489-85), нитратный азот — потенциометрическим методом (ГОСТ 26951-86). Содержание минерального азота рассчитывали суммированием аммонийной и нитратной форм. Определение содержания НРК в растениях проводили в воздушно-сухих размолотых образцах: общего азота — по методу Кьельдаля (ГОСТ 13496.4-93), общего фосфора — спектрофотометрическим методом (ГОСТ 28902-91), общего калия — пламенно-фотометрическим методом после озоления (ГОСТ 30504-97). Содержание тяжелых металлов в почве (вытяжка 1н. HCl и ацетатно-аммонийный буфер (ААБ) pH 4.8) и растениях определяли методом атомной абсорбции [15] на атомно-абсорбционном спектрометре iCE 3500 с пламенной атомизацией (Thermo Scientific, США).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ динамики агрохимических свойств исследованной почвы показал, что содержание подвижных форм основных элементов питания перед посевом озимой ржи было высоким и очень высоким, содержание органического углерода — низким, характерным для дерново-подзолистых почв Предуралья. Кислотность почвы в зависимости от вариантов опыта варьировала от среднекислой до очень сильнокислой, pH_{KCl} 4.7–3.9 (табл. 1). Длительное систематическое применение минеральных удобрений привело к существенному подкислению дерново-подзолистой почвы. При внесении НРК в дозе 150 кг/га отмечено снижение pH_{KCl} на 0.3–0.8 ед. в течение всего вегетационного периода. Длительное внесение

Таблица 1. Изменение агрохимических свойств дерново-подзолистой почвы в течение вегетационного периода (6-я ротация)

Вариант	рН _{KCl}	N-NH ₄	N-NO ₃	N _{мин}	P ₂ O ₅	K ₂ O	C _{орг} , %
		мг/кг					
Перед посевом							
Без удобрений	4.7	30.0	17.0	47.0	200	138	1.06
N60P60K60	4.6	20.5	18.0	38.5	268	192	1.28
N90P90K90	4.1	20.3	16.9	37.2	342	300	1.37
N150P150K150	3.9	18.1	22.3	40.4	506	403	1.36
Кущение							
Без удобрений	5.0	22.3	3.9	26.2	148	136	1.10
N60P60K60	4.6	23.8	5.1	28.9	210	176	1.17
N90P90K90	4.4	29.4	8.6	30.0	305	216	1.17
N150P150K150	4.3	33.4	9.4	42.0	419	278	1.23
Колошение							
Без удобрений	4.7	11.6	2.5	14.1	177	170	1.11
N60P60K60	4.4	11.9	6.1	18.0	293	283	1.21
N90P90K90	4.0	12.7	17.9	30.6	410	307	1.19
N150P150K150	3.9	14.2	29.5	43.7	540	381	1.30
Полная спелость							
Без удобрений	4.5	5.1	3.4	8.5	185	180	1.10
N60P60K60	4.6	5.4	7.5	12.9	276	241	1.24
N90P90K90	4.3	4.9	6.2	11.1	321	249	1.24
N150P150K150	4.2	4.7	6.9	11.6	479	294	1.29
HCP ₀₅	0.2	2.5	1.8	3.8	34	23	0.10

минеральных удобрений обеспечило сохранение исходного содержания в почве органического углерода. Минеральные удобрения могут способствовать увеличению содержания органического вещества благодаря увеличению количества поступающего в почву органического материала, изменению физико-химических свойств почвы, увеличению численности и активности почвенных микроорганизмов [16–18]. Максимальное достоверное увеличение содержания органического углерода в 1.2–1.3 раза отмечено перед посевом озимой ржи и в фазе полной спелости растений, что связано с нахождением почвы в относительно стабильном состоянии. В фазах кушения и колошения влияние минеральных удобрений проявилось в меньшей степени, что можно объяснить активной минерализацией органического вещества.

Выявлено уменьшение содержания минерального азота в почве к фазе полной спелости в 3–5 раз относительно его содержания в почве перед посевом. Минеральный азот в фазах кушения и полной спелости был представлен в большей сте-

пени аммиачной формой, процесс нитрификации был слабым из-за холодной и дождливой погоды вегетационного периода. Примерно одинаковое количество нитратной и аммонийной форм азота определено в почве в фазе колошения. Содержание P₂O₅ и K₂O в зависимости от фаз развития растений озимой ржи изменялось в меньшей степени. Их минимальное количество во всех вариантах отмечено в фазе кушения. При длительном внесении минеральных удобрений выявлено увеличение содержания подвижного фосфора и обменного калия по сравнению с контрольным вариантом в 1.3–3.1 раза во всех фазах развития озимой ржи. Отмечена тесная корреляция между содержанием минерального азота, подвижного фосфора и обменного калия в почве (в фазах весеннего кушения и колошения) и дозами внесенных минеральных удобрений ($r = 0.92–0.99$).

Озимая рожь – важнейшая продовольственная и кормовая культура. Она менее требовательна к почвенным и климатическим условиям, чем другие зерновые, хорошо отзывается на внесение минеральных удобрений. Считается, что расте-

Таблица 2. Содержание азота, фосфора и калия в растениях озимой ржи в разных фазах ее развития, %

Вариант	N			P ₂ O ₅			K ₂ O		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Корни									
Без удобрений	0.72	0.87	0.60	0.51	0.38	0.23	2.29	1.54	0.37
N60P60K60	0.64	1.23	0.90	0.74	0.51	0.27	2.11	1.98	0.36
N90P90K90	0.65	1.73	0.84	0.74	0.57	0.29	2.61	2.53	0.29
N150P150K150	0.68	1.76	0.95	0.84	0.45	0.30	3.04	1.55	0.24
Надземная масса (стебли + листья)									
Без удобрений	3.08	1.87	0.37	1.03	0.71	0.16	4.20	2.70	0.50
N60P60K60	4.11	2.13	0.60	1.37	0.84	0.18	4.95	3.07	0.55
N90P90K90	4.42	2.92	0.74	1.35	0.84	0.18	5.51	3.69	0.64
N150P150K150	4.58	2.59	0.94	1.52	0.84	0.22	5.79	3.57	0.77
Зерно									
Без удобрений			1.46			0.84			0.50
N60P60K60			1.76			0.84			0.48
N90P90K90			1.85			0.82			0.51
N150P150K150			1.95			0.85			0.50
HCP ₀₅	0.13	0.12	0.13	0.05	0.10	0.05	0.20	0.20	0.06

Примечание. В графе 1 – фаза кущения, 2 – фаза колошения, 3 – фаза полной спелости.

ния озимой ржи к фазе весеннего кущения потребляют 35–50%, к фазе выхода в трубку – 75–80% максимального поступления азота за вегетацию [19–21]. За этот период растения поглощают 55–58% фосфора и 50–52% калия из почвы и удобрений, к концу колошения их поступление из почвы практически завершается. По данным наших исследований, наибольшее количество азота в корнях озимой ржи отмечено в фазе колошения (0.87–1.76%). К фазе полной спелости содержание этого элемента в корнях уменьшалось в 1.4–2.1 раза в зависимости от варианта опыта (табл. 2). Максимальное количество фосфора и калия в корнях отмечено в фазе весеннего кущения (0.51–0.84 и 2.11–3.04% соответственно), наблюдали постепенное их снижение к фазе полной спелости: содержание P₂O₅ снизилось в 2.2–2.8 раза, K₂O – в 5.9–12.7 раза.

В надземной массе озимой ржи наблюдали максимальное накопление основных элементов питания в фазе весеннего кущения. Содержание N в зависимости от дозы NPK варьировало от 3.08 до 4.58%, фосфора – от 1.03 до 1.52% и калия – от 4.20 до 5.79%. Количество азота, фосфора и калия в надземной части растений снижалось по мере созревания культуры. Их содержание в стеблях и листьях растений к фазе колошения уменьшилось в 1.5–1.9 раза. В зерне и соломе количество

NPK было в 4.9–9.0 раза меньше, чем в надземной массе растений в период кущения.

Основную часть элементов питания растения используют в период весеннего кущения до фазы конец колошения–начало цветения на формирование биомассы и конечного урожая. В фазе полной спелости наблюдают отток элементов питания из корней, листьев и стеблей в органы накопления ассимилятов для формирования зерна. Содержание азота в зерне составило 1.46–1.95, P₂O₅ – 0.82–0.85, K₂O – 0.48–0.51% в зависимости от дозы внесенных минеральных удобрений. Тесная корреляционная связь установлена между дозами NPK и количеством азота в зерне и соломе озимой ржи ($r = 0.97$ и 0.95 соответственно). Таким образом, озимая рожь наиболее интенсивно поглощала азот в фазе кущения и аккумулировала его в основном в стеблях и листьях. Аналогично процесс биологической аккумуляции проходил для фосфора и калия. Их было практически в 2 раза больше в стеблях и листьях, чем в корнях в фазах кущения и колошения. В фазе полной спелости в зерне аккумулировалось больше азота и фосфора, чем в других органах растений.

Для оценки безопасности использования минеральных удобрений были проведены исследования по содержанию в почве подвижных форм меди, цинка, кадмия и свинца, т.к. ТМ на сегодняшний день являются одними из основных за-

Таблица 3. Содержание тяжелых металлов в почве в разных фазах развития растений озимой ржи, мг/кг

Вариант	Cu		Pb		Zn		Cd	
	1М НСl	ААБ рН 4.8	1М НСl	ААБ рН 4.8	1М НСl	ААБ рН 4.8	1М НСl	ААБ рН 4.8
Перед посевом								
Без удобрений	6.62	0.98	9.08	Ниже предела обнаружения	5.23	1.32	0.54	0.39
N60P60K60	4.84	1.21	6.09		5.08	1.33	0.55	0.39
N90P90K90	5.12	3.68	7.98	1.64	5.22	1.21	0.55	0.47
N150P150K150	5.45	3.02	7.29	1.70	5.74	1.35	0.57	0.47
Кушение								
Без удобрений	4.50	Ниже пре- дела обна- ружения	4.67	Ниже предела обнаружения	5.42	1.35	0.57	0.56
N60P60K60	4.31		4.76		5.50	1.44	0.56	0.57
N90P90K90	4.40		5.02		5.65	1.48	0.56	0.56
N150P150K150	4.30		4.89		5.92	1.44	0.56	0.59
Колошение								
Без удобрений	4.50	Ниже пре- дела обна- ружения	4.69	Ниже предела обнаружения	5.76	1.24	0.56	0.58
N60P60K60	4.37		4.23		6.00	1.22	0.58	0.58
N90P90K90	4.50		4.16		6.41	1.35	0.49	0.36
N150P150K150	4.37		4.37		6.59	1.46	0.43	0.38
Полная спелость								
Без удобрений	4.59	Ниже пре- дела обна- ружения	4.21	Ниже предела обнаружения	5.74	1.07	0.43	0.35
N60P60K60	4.30		4.10		6.28	1.13	0.42	0.37
N90P90K90	4.54		4.31		6.48	1.17	0.43	0.37
N150P150K150	4.60		4.48		7.15	1.30	0.45	0.36
НСР ₀₅	1.63	0.64	1.11	0.27	0.22	0.27	0.10	0.02
ПДК	50	3	60	6	60	23	1.0	—

грязнителей окружающей среды [22, 23]. Кроме этого, территория опытного поля Пермского НИИСХ ПФИЦ УрО РАН находится под влиянием ветров, дующих с Осенцовского промышленного узла, поэтому объекты окружающей среды (почва и растительность) могут быть загрязнены токсичными веществами. В 2013 г. вблизи исследованных участков была открыта федеральная трасса Пермь–Екатеринбург.

Кислоторастворимые формы ТМ, извлекаемые 1М НСl, характеризуют потенциальный запас подвижных соединений металлов в почве. Цинк и медь относятся к группе приоритетных антропогенных загрязнителей, в то же время они являются биофильными микроэлементами, способствуют формированию генеративных органов растений. По степени обеспеченности микроэлементами [24] изученная почва относится к категории “средне обеспеченная” медью и “низко обеспеченная” цинком. По данным [4, 5], свинец и кадмий не считаются жизненно необходимыми для растений, не имеют определенного функцио-

нального значения. Однако роль этих элементов выяснена не до конца. В работах [25–29] отмечали положительное действие свинца на рост и развитие растений и кадмия – на всхожесть семян [30]. Содержание кислоторастворимых форм ТМ в пахотном слое (0–20 см) во всех фазах развития озимой ржи не превышало предельно-допустимых концентраций (ПДК) для почв и не зависело от дозы внесенных удобрений (табл. 3). Проект нормативов предельно допустимого содержания в почве кислоторастворимых форм (потенциально доступных для растений) элементов в свое время был незавершен. Несмотря на это, он нашел применение в практике экологических работ, однако эти нормативы не являются официально утвержденными [22]. Отмечена тенденция к уменьшению содержания кадмия в кислотной вытяжке в фазе полной спелости ржи.

Содержание ТМ в ацетатно-аммонийной вытяжке (рН 4.8) характеризует их “актуальную подвижность”. Концентрация в почве подвижных соединений ТМ динамична во времени, что объ-

Таблица 4. Влияние минеральных удобрений на содержание цинка в надземной и корневой массе озимой ржи, мг/кг

Вариант	Кушение		Колошение		Полная спелость		
	надземная масса	корни	надземная масса	корни	зерно	солома	корни
Без удобрений	33.1	28.2	25.5	19.6	18.9	7.3	15.8
N60P60K60	37.4	37.9	31.9	27.6	11.5	9.8	Ниже пре-дела обнару-жения
N90P90K90	38.7	33.9	28.9	31.9	32.1	19.1	
N150P150K150	37.3	33.9	30.4	35.0	35.3	18.7	
HCP ₀₅	1.7	2.5	3.8	5.4	10.1	6.3	—
ПДК/МДУ*					50	50	—

*МДУ – максимально-допустимый уровень содержания элемента в кормах сельскохозяйственных животных (соломе, зерне, зернофураже).

ясняется, прежде всего, деятельностью микроорганизмов и возрастными изменениями интенсивности поглощения химических элементов растениями. Содержание подвижных форм меди и свинца, извлекаемых ААБ (рН 4.8), во всех фазах роста озимой ржи оказалось ниже предела обнаружения. Внесение удобрений оказало влияние в большей степени на подвижность в почве кадмия и цинка. Концентрация подвижной формы цинка, извлекаемой ААБ (рН 4.8), изменялась от 1.35–1.48 в фазе кушения до 1.07–1.30 мг/кг в фазе полной спелости, кадмия – от 0.56–0.59 до 0.35–0.37 мг/кг соответственно. Превышения ПДК в почве подвижных форм меди, свинца и цинка, извлекаемых из почвы ААБ (рН 4.8), не наблюдали [31].

Известно, что на поступление ТМ из почвы в растения влияют такие факторы, как кислотность почвы, гранулометрический состав, содержание органического вещества и погодные условия вегетационного периода [11, 32]. В сухую погоду усиливается процесс перехода ТМ из почвы в растения, в сырую – замедляется. В растительной массе ТМ накапливаются по-разному. Исследованиями доказано, что в корнях накапливается наибольшее количество ТМ, в генеративных органах – наименьшее. По степени насыщенности ТМ основные органы растений обычно располагаются в ряд: корни > листья > стебли > семена (плоды) [33]. Для некоторых ТМ, например, свинца характерна противоположная направленность распределения в органах растений [13]. Это связано с неодинаковой биофильностью элементов. Различия в распределении обусловлены проявлением защитных механизмов растений по отношению к “ненужным” элементам или концентрациям, превышающим потребности.

Анализ различных частей растений озимой ржи показал, что содержание в них меди, свинца

и кадмия было меньше предела обнаружения, а содержание цинка в корнях, стеблях и листьях уменьшалось постепенно при переходе растений из вегетативной фазы в репродуктивную (табл. 4). Содержание цинка в зерне озимой ржи варьировало от 11.5 до 35.3, в соломе – от 7.3 до 19.1 мг/кг и не превышало ПДК для пищевых продуктов [34] и МДУ для кормов сельскохозяйственных животных [35]. Полученная продукция может быть использована как на продовольственные цели, так и на кормовые. Применение удобрений увеличило количество цинка в растениях озимой ржи (корнях, надземной массе, зерне) в 1.1–2.6 раза. Таким образом, в условиях незагрязненной ТМ дерново-подзолистой почвы была получена экологически чистая сельскохозяйственная продукция.

ВЫВОДЫ

1. Длительное систематическое внесение минеральных удобрений способствовало сохранению исходного содержания органического углерода в почве, увеличению содержания подвижного фосфора и обменного калия в 1.3–3.1 раза. Отмечено существенное подкисление дерново-подзолистой почвы. Максимальное влияние на агрохимические показатели почвы наблюдали при дозе NPK150.

2. Установлено, что озимая рожь наиболее интенсивно поглощала азот в фазе кушения и аккумулировала его в основном в стеблях и листьях. Аналогично процесс биологической аккумуляции проходил для фосфора и калия. Их содержание было практически в 2 раза больше в надземной массе, чем в корнях, в фазах кушения и колошения. В фазе полной спелости в зерне аккумулировалось азота и фосфора больше, чем в других органах растений.

3. Содержание кислоторастворимых форм тяжелых металлов в почве не зависело от дозы внесенных удобрений. Содержание подвижных форм меди и свинца, извлекаемых ААБ (рН 4.8), в почве во всех фазах роста озимой ржи было ниже предела обнаружения. Внесение НРК оказало влияние в большей степени на содержание в почве подвижных форм кадмия и цинка, извлекаемых ААБ (рН 4.8).

4. Длительное систематическое применение возрастающих доз НРК от 60 до 150 кг д.в./га не привело к накоплению тяжелых металлов в растениях озимой ржи. Концентрация меди, свинца и кадмия была меньше предела обнаружения. Содержание цинка в озимой ржи (корнях, надземной массе, зерне) варьировало от 7.3 до 38.7 мг/кг, что не превышало ПДК для зерна и МДУ для солом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кидин В.В.* Система удобрения. М.: РГАУ–МСХА, 2012. 534 с.
2. *Елькина Г.Я.* Оптимизация минерального питания растений на подзолистых почвах. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 278 с.
3. *Сычев В.Г., Шафран С.А., Виноградова С.Б.* Плодородие почвы России и пути его регулирования // Плодородие. 2020. № 6. С. 3–13.
4. *Дабахов М.В., Дабахова Е.В., Титова В.И.* Тяжелые металлы: экотоксикология и проблемы нормирования. Н. Новгород: Изд-во ВВАГС, 2005. 165 с.
5. *Алексеев Ю.В.* Тяжелые металлы в почвах и растениях. Л., 1987. 142 с.
6. *Nino-Savala A.G., Zhuang Z., Ma X., Fangmeier A., Li H.F., Tang A.H., Liu X.J.* Cadmium pollution from phosphate fertilizers in arable soils and crops: an overview // Front. Agricult. Sci. Engin. 2019. № 6 (4). P. 419–430. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2019273>
7. *Ладонин Д.В., Марголина С.Е.* Взаимодействие гуминовых кислот с тяжелыми металлами // Почвоведение. 1997. № 7. С. 806–811.
8. *Добровольский Г.В., Розанов Б.Г., Гришина Л.А.* Охрана почв на современном этапе. Проблемы почвоведения в агрохимии. М.: Наука, 1986. С. 118–130.
9. *Потатуева Ю.А.* Эколого-агрохимическая оценка фосфорных и фосфорсодержащих удобрений в длительных полевых опытах // Агрохимия. 2013. № 6. С. 83–94.
10. *Митрофанова Е.М.* Агроэкологические аспекты снижения отрицательного влияния кислотности почв в условиях адаптивно-ландшафтного земледелия Предуралья: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Пермь: ПермГСХА им. Д.Н. Прянишникова, 2011. 46 с.
11. *Витковская С.Е.* Оценка риска загрязнения агроэкосистем тяжелыми металлами // Агрохимия. 2013. № 11. С. 78–85.
12. *Соколов О.А., Черников В.А.* Экологическая безопасность и устойчивое развитие. Атлас распределения тяжелых металлов в объектах окружающей среды. Пушкино: ОНТИ ПНЦ РАН, 1999. 184 с.
13. *Минкина Т.М., Мотузова Г.В., Мирошниченко Н.Н., Фатеев А.И., Манджиева С.С., Чаплыгин В.А.* Накопление и распределение тяжелых металлов в растениях зоны техногенеза // Агрохимия. 2013. № 9. С. 65–75.
14. *Черников В.А., Соколов О.А.* Экологически безопасная продукция. М.: Колос, 2009. 438 с.
15. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельскохозяйственных угодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 57 с.
16. *Семенов В.М., Козут Б.М.* Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
17. *Christopher S.F., Lal R.* Nitrogen management affects carbon sequestration in North American cropland soils // Critic. Rev. Plant Sci. 2007. V. 26. P. 45–64. <https://doi.org/10.1080/07352680601174830>
18. *Verdenelli R.A., Dominchin M.F., Perez-Brandan C., Rovea A., Vargas-Gil S., Meriles J.M.* Effect of long-term mineral fertilisation on soil microbial abundance, community structure and diversity in a Typic Hapludoll under intensive farming systems // Annal. Appl. Biol. 2019. V. 3 (175). P. 363–375. <https://doi.org/10.1111/aab.12546>
19. *Шмырева Н.Я.* Использование азота удобрений озимой рожью при различных способах внесения азотных удобрений в условиях эрозионных ландшафтов // Агрохимия. 2007. № 10. С. 44–49.
20. *Шарифуллин Л.Р., Кольцов А.Х., Марьин Г.С.* Интенсивные технологии возделывания озимой ржи. М.: Агропромиздат, 1989. 125 с.
21. *Минеев В.Г.* Агрохимия. М.: Наука, 2006. 719 с.
22. *Ильин В.Б.* Тяжелые металлы в системе почва–растение. Новосибирск: Наука, 1991. 151 с.
23. *Елькина Г.Я., Денева С.В., Лантева Е.М.* Тяжелые металлы в системе почва–растение в биогеоценозах Большеземельной тундры // Теор. и прикл. экол. 2019. № 3. С. 41–47. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-3-041-047>
24. *Сычев В.Г., Аристархов А.Н.* Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: Росинформагротекс, 2003. 240 с.
25. *Арышева С.П., Анисимов В.С., Санжарова Н.И.* Изучение миграционной способности Рb в системе почва–растение и его фитотоксичность в почвах разного типа // Агрохимия. 2013. № 1. С. 85–94.
26. *Убугунов В.Л., Доржонова В.О.* Оценка фитотоксичности свинца в дерново–подбуре // Вестн. ТомскГУ. 2010. № 338. С. 207–211.
27. *Дмитраков Л.М., Дмитракова Л.К., Абашина Н.А., Пинский Д.Л.* Влияние свинца на морфометрические показатели овса // Агрохимия. 2004. № 8. С. 48–53.

28. *Титов А.Ф., Лайдинен Г.Ф., Казнина Н.М.* Влияние ионов свинца на рост и морфофизиологические показатели растений ячменя и овса // Физиол. и биохим. культ. раст. 2001. Т. 33. № 5. С. 387–393.
29. *Елькина Г.Я.* Поведение свинца в системе почва–растение в условиях европейского Северо-Востока // Агрехимия. 2015. № 8. С. 73–80.
30. *Мельничук Ю.П.* Влияние ионов кадмия на клеточное деление и рост растений. Киев: Наукова думка, 1990. 148 с.
31. ГН 2.1.7.2041-06 “Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве”. М.: Информ.-издат. центр Госкомсанэпиднадзора России, 2006.
32. *Водяницкий Ю.Н.* Природные и техногенные соединения тяжелых металлов в почвах // Почвоведение. 2014. № 4. С. 420–432.
33. *Ильин В.Б.* Тяжелые металлы в системе почва–растение // Почвоведение. 2007. № 9. С. 1112–1119.
34. СанПиН 2.3.2.1078-01. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. М.: Минздрав РФ, 2002.
35. Временный максимально-допустимый уровень (МДУ) некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках. М.: Госагропром СССР, ГУ ветеринарии, 1987. 5 с.

Influence of the Mineral Fertilizers on Sod-Podzolic Soil Fertility, Content of Major Nutrients and Heavy Metals in Winter Rye

N. E. Zavyalova^{a, #}, M. T. Vashieva^a, and D. G. Shyshkov^a

^a Perm Research Institute of Agriculture of the Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS
ul. Kul'tury 12, Perm Territory, Lobanovo 614532, Russia

[#]E-mail: nezavyalova@gmail.com

It was studied the effect of prolonged systematic use (40 years) of increasing doses of mineral fertilizers on soil fertility indicators. There was an increase in the content of organic carbon by 1.2–1.3 times, mobile phosphorus and exchange potassium by 1.3–3.1 times. Significant soil acidification was noted. Maximum changes were observed at a dose of NPK of 150 kg a.v./ha. The distribution of nitrogen, phosphorus and potassium in winter rye plants (roots, aerial mass, grain) is considered. The effect of mineral fertilizers on the content of mobile forms of heavy metals (extract 1n. HCl and AAB with pH 4.8) in the soil was studied, and their input into plants was assessed by the phases of development of winter rye (tillering, heading, full ripeness).

Key words: long stationary experience, agrochemical properties of the soil, heavy metals.

УДК 631.98:633.18

НОВЫЙ РЕГУЛЯТОР РОСТА ДЛЯ РАСТЕНИЙ РИСА¹

© 2021 г. Л. В. Дядюченко^{1,*}, В. В. Тараненко¹, В. С. Муравьев¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт биологической защиты растений
350039 Краснодар-39, Россия

*E-mail: ludm.dyadiuchenko@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.09.2020 г.

После доработки 13.10.2020 г.

Принята к публикации 11.01.2021 г.

Проведен синтез и скрининг регуляторов роста риса в ряду производных пиридилгидразонов. В лабораторном опыте отобрано перспективное соединение 4-метил-2-хлор-6-([1-метил-4-(нитробензилден)]гидразино)-никотинотриил, которое было изучено в условиях поля в течение 3-х полевых сезонов. Опыты проводили на растениях риса сортов Ивушка и Рыжик. По данным трехлетних испытаний, при использовании нового регулятора роста увеличивалась длина метелки риса, количество зерен в метелке, масса зерен в главной метелке, масса 1000 зерен, что способствовало существенному повышению урожайности. Наиболее высокий рострегулирующий эффект был получен при двукратном нанесении регулятора роста на вегетирующие растения риса в фазе кушения и фазе выметывания при норме расхода 30 г/га. Зерно, выращенное с использованием рострегулятора, отличалось более высоким содержанием белка и амилозы в сравнении с зерном контрольного варианта (без обработки).

Ключевые слова: рис, сорт Ивушка, сорт Рыжик, регуляторы роста растений, синтез, скрининг, пиридилгидразоны, структура урожая, прибавка урожая, белок, амилоза.

DOI: 10.31857/S0002188121040049

ВВЕДЕНИЕ

Рис – тропическое растение из семейства злаковых. По времени возделывания и ценным качествам он по праву считается самым популярным злаком во всем мире. Для 1/3 населения земного шара рис является главным продуктом питания, обеспечивающим организм человека необходимыми веществами. Его калорийность больше, чем других зерновых культур. Зерно риса очень богато крахмалом (88%). В составе есть углеводы, жиры, клетчатка, зола, витамины и белок. Белок риса по сравнению с другими зерновыми культурами содержит повышенное количество таких незаменимых аминокислот как лизин, валин, метионин, благодаря чему он лучше переваривается и усваивается организмом человека.

При переработке культуры риса рационально используются отходы. Лом и сечку направляют на производство пива, спирта и крахмала. В рисовых отрубях остается много полезных веществ, жиров и белка, благодаря которым они служат питательным кормом для скота, а из соломы вырабатывают бумагу.

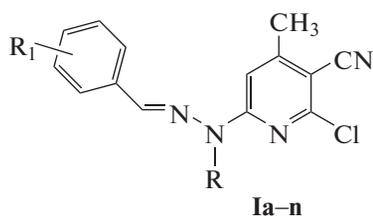
Российская Федерация является самой северной зоной рисосеяния в мире. Основной регион, возделывающий рис в России, – Северо-Кавказский, в котором главную долю посевов имеет Краснодарский край (~80%). На втором месте по объемам производства – Приморский край, еще меньше риса возделывают в Астраханской обл. и Калмыкии. В 2019 г. Россия вырастила 1.099 т риса более чем 2-х десятков сортов. Разумеется, этого объема недостаточно для удовлетворения внутреннего спроса. Поэтому весьма актуальным на сегодняшний день является поиск регуляторов роста растений, повышающих урожай и качество этой ценной культуры. Работы по скринингу регуляторов роста риса среди природных и синтетических веществ проводят как в России [1–4], так и за рубежом [5–8]. Цель работы – синтез и скрининг регуляторов роста риса в ряду производных пиридилгидразонов, а также проверка их рострегулирующей активности в полевых условиях на разных сортах риса.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Настоящая работа направлена на поиск новых рострегуляторов риса в классе производных пиридилгидразонов. С этой целью была синтезиро-

¹ Исследование выполнено в соответствии с государственным заданием № 075-00376-19-00 Министерства науки и высшего образования РФ в рамках НИР по теме № 0686-2019-0013.

вана серия 3-цианопиридил-6-гидразонов общей формулы **I**:



где R = H, алкил; R¹ = алкил, алкокси, галогенил, нитро, amino, алкиламино.

Ранее нами в числе представителей этого класса соединений были найдены эффективные гербицидные антидоты [9, 10] и иммуномодуляторы сахарной свеклы [11].

Для всех синтезированных соединений определены физико-химические константы (T_{пл}, T_{кип}), их структура подтверждена элементным анализом, а также методами ЯМР ¹H- и ¹³C-спектроскопии и масс-спектрометрии. Индивидуальность соединений установлена с помощью тонкослойной хроматографии. Выход целевых веществ составил 78–94%. Для синтеза продуктов и их предшественников использованы методики, описанные в работах [12, 13].

Первичную оценку активности новых соединений осуществляли в лабораторном опыте по величине их рострегулирующего эффекта. Для этого использовали официально рекомендованную методику проращивания семян [14]. Вещества, отобранные по результатам лабораторного опыта, исследовали в полевых условиях в 2017–2019 гг. на экспериментальном орошаемом участке ВНИИ риса г. Краснодара.

Почвенно-климатические условия периода исследования были благоприятными для роста и развития растений риса. Почва лугово-черноземная, слабосолонцеватая, тяжелосуглинистая характеризуется следующими показателями: содержание гумуса – 3.3%, подвижных форм азота – 0.44, фосфора – 3.85 и калия – 18.2 мг/100 г почвы. Емкость катионного обмена – 28.6 мг-экв/100 г почвы, pH 7.3.

В опытах использовали 2 сорта риса: сорт Ивушка – длиннозерный, потенциал урожайности 10.0–12.0 т/га, стекловидность – 97–98% и сорт Рыжик с окрашенным перикарпом, потенциал урожайности 10.0–12.0 т/га, крупнозерный, стекловидность – 50%.

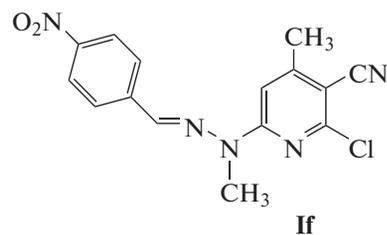
Агротехнические работы – общепринятые для данной рисовой зоны [15]. Высев семян риса произведен селекционной сеялкой с нормой посева 5 млн всхожих семян/га. Предпосевную обработку семян проводили непосредственно в поле перед посевом, обработку вегетирующих растений

осуществляли путем опрыскивания водным раствором регулятора роста из расчета 30 г/га при расходе воды 300 л/га. Учетная площадь опытной делянки составляла 10 м², повторность четырехкратная. Уборку производили в период полной спелости зерна. Рострегулирующую активность изученного соединения определяли по увеличению урожая растений, обработанных регулятором роста в сравнении с контролем (необработанные растения). Данные учета подвергали статистической обработке с использованием дисперсионного анализа [16]. Качественные показатели зерна определяли на анализаторе ФТ-10.

Опыты предусматривали следующие варианты: 1 – контроль (без обработки), 2 – обработка семян регулятором роста перед посевом в дозе 30 г/т, 3 – обработка растений регулятором роста в фазе кушения, доза 30 г/га, 4 – обработка растений регулятором роста в фазе выметывания, доза 30 г/га. 5–2-кратная обработка растений регулятором роста в фазах кушения и выметывания (30 + 30 г/га).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В лабораторном опыте на проростках риса было отобрано соединение 4-метил-2-хлор-6-[[1-метил-4-(нитробензилиден)]гидразино]-никотинитрил (соединение **If**), проявлявшее рострегулирующую активность на уровне 18–20%:



Данное соединение изучали в полевых опытах. Условия вегетации 2017–2019 гг. были достаточно благоприятными для роста и развития растений риса. В табл. 1 представлены данные о влиянии изученного рострегулятора на урожайность риса сортов Ивушка и Рыжик. Трехлетние полевые испытания свидетельствовали, что применение продукта **If** обеспечивало достоверное и стабильное повышение урожая. Лучшие результаты получены при использовании регулятора роста дважды: в фазе кушения и фазе выметывания, прибавка урожая риса сорта Ивушка в данном варианте составляла 25.1–27.3%, сорта Рыжик – 19.9–23.3%. Однократное применение соединения **If** способствовало увеличению урожайности сорта Ивушка до 12.0% при обработке в фазе кушения и до 9.7% при обработке в фазе выметывания. Урожайность сорта Рыжик возрастала на

Таблица 1. Влияние регулятора роста на продуктивность сортов риса

Вариант	Способ обработки	Сорт Ивушка			Сорт Рыжик		
		Урожай- ность, ц/га	прибавка к контролю		Урожай- ность, ц/га	прибавка к контролю	
			ц/га	%		ц/га	%
2017 г.							
Контроль	Без обработки	61.9	—	—	62.9	—	—
If	Обработка семян	64.4	2.5	4.0	65.0	2.1	3.3
If	В фазе кущения	68.0	6.1	9.8	71.0	8.1	12.9
If	В фазе кущения + + фазе выметывания	78.4	16.5	26.6	82.8	19.9	31.6
If	В фазе выметывания	67.5	5.6	9.0	70.2	7.3	11.6
	<i>HCP</i> ₀₅	2.4	1.1	—	2.0	0.9	—
2018 г.							
Контроль	Без обработки	63.3	—	—	63.6	—	—
If	Обработка семян	64.9	1.6	2.5	65.8	2.2	3.4
If	В фазе кущения	69.2	5.9	9.3	71.8	8.2	12.9
If	В фазе кущения + + фазе выметывания	79.2	15.9	25.1	84.6	21.0	33.0
If	В фазе выметывания	68.6	5.3	8.4	72.3	8.7	13.7
	<i>HCP</i> ₀₅	1.6	0.5	—	1.6	0.4	—
2019 г.							
Контроль	Без обработки	63.1	—	—	65.4	—	—
If	Обработка семян	65.4	3.1	5.0	69.0	2.7	5.2
If	В фазе кущения	70.6	8.3	12.0	75.8	9.5	12.5
If	В фазе кущения + + в фазе выметывания	85.7	23.4	27.3	89.6	23.3	26.0
If	В фазе выметывания	69.0	6.7	9.7	82.4	16.1	19.5
	<i>HCP</i> ₀₅	1.5	0.6	—	1.9	0.6	—

Таблица 2. Влияние регулятора роста на структуру урожая сортов риса (средние за 2017–2019 гг.)

Вариант	Высота растений, см	Длина метелки, см	Количество зерен в метелке, шт.	Масса зерна с главной метелки, г	Масса 1000 зерен, г
Сорт Ивушка					
Контроль (без обработки)	84.0	24.4	105	2.00	25.7
If (обработка семян)	86.3	25.7	108	2.24	26.4
If (в фазе кущения)	88.2	26.5	124	2.44	26.8
If (в фазе выметывания)	86.7	26.0	132	3.06	27.1
If (в фазах кущения + + выметывания)	91.6	27.3	143	2.67	27.3
<i>HCP</i> ₀₅	2.2	1.6	16	0.42	1.1
Сорт Ивушка					
Контроль (без обработки)	76.7	16.2	127	2.14	12.9
If (обработка семян)	79.1	16.5	139	2.23	13.5
If (в фазе кущения)	80.0	17.0	167	2.56	15.6
If (в фазе выметывания)	79.4	16.6	158	2.70	16.4
If (в фазах кущения + + выметывания)	81.5	17.4	179	2.79	17.7
<i>HCP</i> ₀₅	2.2	0.8	14	0.32	1.1

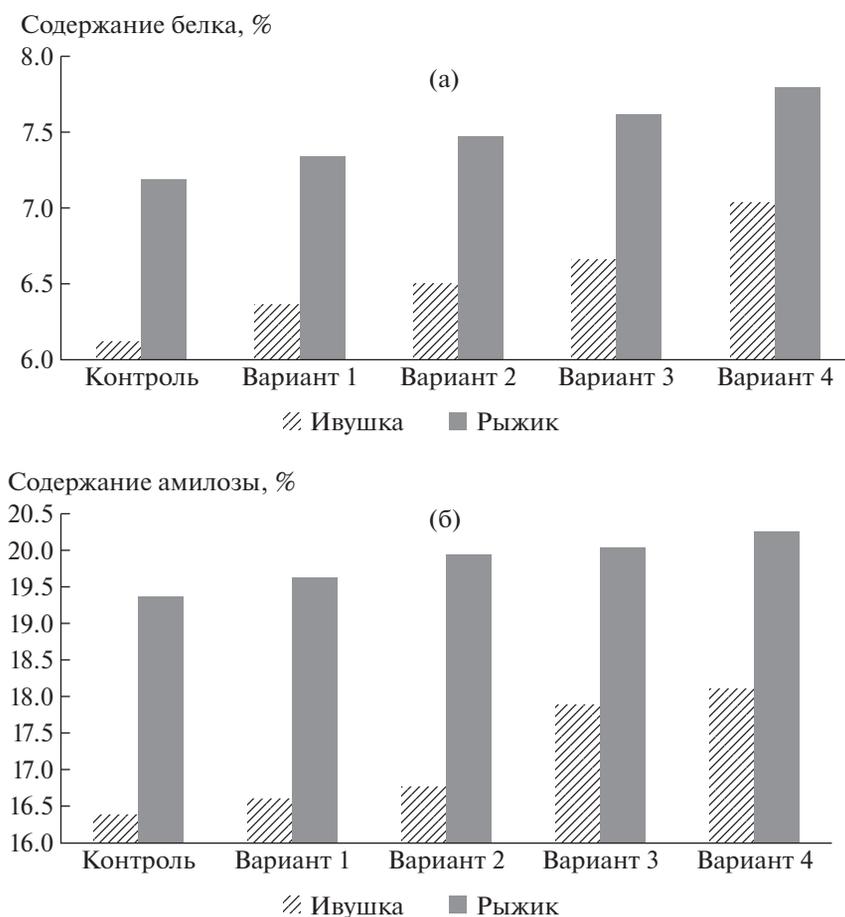


Рис. 1. Содержание белка (а) и амилозы (б) в зерне риса сортов Ивушка и Рыжик (средние за 2017–2019 гг.), варианты: 1 – обработка семян, 2 – обработка в фазе кущения, 3 – обработка в фазе выметывания, 4 – обработка в фазах кущения + выметывания.

12.5–12.9 и 11.6–19.5% при применении рострегулятора в фазе кущения и фазе выметывания соответственно. В варианте, предусматривающем только обработку семян, прибавка урожая не превышала 5.2% у обоих сортов риса.

Повышение урожайности является закономерным следствием положительного влияния регулятора роста на развитие органов, формирующих структуру урожая культуры (табл. 2). Например, при двукратном применении изученного соединения на рисе сорта Ивушка длина метелки увеличилась на 11.1% относительно контроля, количество зерен в метелке – на 36.0%, масса зерна с главной метелки – на 33.5%. Под влиянием рострегулятора было получено более крупное зерно, масса 1000 зерен возросла на 6.2%. Аналогичные результаты получены в опытах на растениях риса сорта Рыжик.

Что касается качества зерна, то применение регулятора роста **If** способствовало увеличению содержания белка на 0.914% относительно кон-

троля в зерне риса сорта Ивушка и на 0.6% в зерне риса сорта Рыжик (рис. 1а, обработка в фазах кущения + выметывание). Содержание амилозы также возросло в варианте с применением рострегулятора, лучшие результаты получены при двукратной обработке соединением **If**: в зерне риса сорта Ивушка содержание амилозы увеличилось на 1.72, сорта Рыжик – на 0.87% (рис. 1б).

Работа защищена патентом РФ [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, синтезированный 4-метил-2-хлор-6-[[1-метил-4-(нитробензиден)]гидразино]-никотинитрил был изучен в качестве регулятора роста в полевых условиях на растениях риса сортов Ивушка и Рыжик в течение 3-летнего периода. Применение изученного продукта оказывало положительное влияние на развитие органов, формирующих структуру урожая культуры, существенно и достоверно увеличивало урожайность обоих сортов риса и повышало качество зерна.

В связи с этим целесообразно рассматривать это соединение в качестве перспективного действующего вещества для создания нового отечественного регулятора роста риса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернышева Н.В., Князева А.О. Урожайность и качество зерна риса в зависимости от применения гуминовых препаратов в технологии его возделывания // Тр. КубГАУ. 2018. № 74. С. 169–173.
2. Караченцев В.В., Ковалев В.С., Злотников А.К., Надькта В.Д., Хоай Н.Т. Альбит в комплексной системе защиты риса // Защита и карантин раст. 2018. № 12. С. 25–28.
3. Чернышева Н.В., Барчукова А.Я., Дирин В.В. Влияние препарата Гидрогумин на рост и развитие растений риса, урожайность и качество его зерна // Тр. КубГАУ. 2016. № 62. С. 127–132.
4. Костылев П.И., Репкина Н.В., Калиевская Ю.П. Влияние Бензихола на урожайность зерна риса // Зерн. хоз-во России. 2015. № 5. С. 36–39.
5. Suseendran K., Kalaiyarasan C., Jawahar S., Vinodkumar S.R., Arivukkarasu K. Response of rice to foliar application of plant growth regulator on growth and yield of rice // Plant Arch. 2020. V. 20. № 1. P. 1510–1514.
6. Basuchaudhuri P. 1-Naphthaleneacetic acid in rice cultivation // Current Sci. 2016. V. 110. № 1. P. 52–56.
7. Fahad S., Hussain S., Saud S., Wang F., Huang J. Exogenously applied plant growth regulators affect heat-stressed rice pollens // J. Agron. Crop Sci. 2016. V. 202. № 2. P. 139–150.
8. Hussain S., Zhang J.-H., Zhong C., Hu J.-J., Jin Q.-Y. Effects of salt stress on rice growth, development characteristics and the regulating ways // J. Integra. Agric. 2017. V. 16. № 11. P. 2357–2374.
9. Дядюченко Л.В., Дмитриева И.Г., Назаренко Д.Ю., Стрелков В.Д. // Антидотная и рострегулирующая активность N1-арил-N2-(замещенный нитринонитрил)-гидразонов // Агрохимия. 2014. № 7. С. 33–37.
10. Стрелков В.Д., Дядюченко Л.В., Дмитриева И.Г., Исакова Л.И. Синтез и скрининг гербицидных антидотов на подсолнечнике // Сб. тр. Международ. конф. “Биологическая защита растений – основа стабилизации агроэкосистем”. Краснодар, 2010. С. 503–515.
11. Дядюченко Л.В., Назаренко Д.Ю., Ткач Л.Н., Тосуннов Я.К., Дмитриева И.Г. Поиск новых иммуномодуляторов сахарной свеклы в ряду производных пиридилгидразонов // Политемат. электр. научн. журн. КубГАУ. 2016. № 122(08). С. 461–470.
12. Дядюченко Л.В., Стрелков В.Д., Михайличенко С.Н., Заплишный В.Н. Синтез некоторых галоген- и нитрозамещенных никотиновых кислот и их фрагментация под электронным ударом // Химия гетероцикл. соед. 2004. № 3. С. 381–388.
13. Дядюченко Л.В., Дмитриева И.Г., Назаренко Д.Ю., Стрелков В.Д. Синтез некоторых замещенных пиридин-3-сульфонилхлоридов, -сульфокислот и -сульфониламидов // Химия гетероцикл. соед. 2014. № 9. С. 1366–1377.
14. Гост 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. Введ. 19.12.1984. М.: Изд-во стандартов, 1985. 57 с.
15. Руководство проведения регистрационных испытаний регуляторов роста растений, дефолиантов и десикантов в сельском хозяйстве. М.: Минсельхоз РФ, 2018.
16. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Изд-во “Книга по требованию”, 2012. 352 с.
17. Дядюченко Л.В., Тараненко В.В. Пат. РФ, № 2712544. Способ повышения урожайности риса. Опубл. 30.01.2020. Бюл. № 4.

New Growth Regulator for Rice Plants

L. V. Dyadyuchenko^{a, #}, V. V. Taranenko^a, and V. S. Muraviev^a

^a All-Russian Research Institute of Biological Plant Protection
Krasnodar-39 350039, Russia

[#] E-mail: ludm.dyadiuchenko@yandex.ru

Synthesis and screening of rice growth regulators in a series of pyridylhydrazones derivatives have been carried out. In a laboratory experiment, a promising compound 4-methyl-2-chloro-6-[[1-methyl-4-(nitrobenzylidene)] hydrazino]-nicotinonitrile was selected, which was studied under field conditions during three field seasons. The experiments were carried out on rice plants of Ivushka and Ryzhik varieties. According to the data of the three-year tests, when using the new growth regulator, the length of the rice panicle, the number of grains in the panicle, the mass of grains in the main panicle, the weight of 1000 grains increased, which contributed to the significant yield increase. The highest growth-regulating effect was obtained with a double application of the growth regulator to vegetative rice plants in the tillering and sprouting phases at a consumption rate of 30 g/ha. The grain grown using the growth regulator had a higher protein and amylose content than the grain in the control variant without treatment.

Key words: rice, Ivushka variety, Ryzhik variety, plant growth regulators, synthesis, screening, pyridylhydrazones, yield structure, yield increase, protein, amylose.

УДК 632.954:631.559:633.63

ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОПРЫСКИВАТЕЛЯ ОСТАТОЧНЫМИ КОЛИЧЕСТВАМИ СУЛЬФОНИЛМОЧЕВИНЫ И ИМИДАЗОЛИНОНА НА ПРОДУКТИВНОСТЬ САХАРНОЙ СВЕКЛЫ

© 2021 г. Е. А. Дворянкин

*Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара им. А.Л. Мазлумова
396030 Воронежская обл., Рамонский р-н, п. ВНИИСС, 86, Россия*

E-mail: dvoryankin149@gmail.com

Поступила в редакцию 13.08.2020 г.

После доработки 08.10.2020 г.

Принята к публикации 11.01.2021 г.

В многолетних полевых испытаниях на опытном поле Всероссийского НИИ сахарной свеклы и сахара исследовано действие сублетальных и изреживающих посев доз гербицидов-ингибиторов фермента ацетолактатсинтазы (АЛС) на растения сахарной свеклы в зависимости от фазы развития культуры и погодных условий. Влияние гербицидов на сахарную свеклу в фазе раннего роста и развития оценивали по показателям нарастания массы и выпадения растений в посевах. Урожайность культуры учитывали количественно – весовым методом с определением сахаристости на поточной линии “Венема”. Гербициды-ингибиторы АЛС (гранстар, ларен, титул, пульсар) в малых дозах подавляли нарастание массы 100 растений сахарной свеклы, изреживали посев, снижали продуктивность культуры в зависимости от количества примеси гербицидов. Нарушение роста и развития растений культуры сопровождалось проявлениями симптомов повреждения – прекращением роста, хлорозом, красной окантовкой листьев, увеличением толщины листьев, характерной ломкостью черешков и листа, некрозом тканей. Примеси гербицидов-ингибиторов АЛС в баке опрыскивателя при обработке сахарной свеклы бетаналом Эксперт ОФ (БЭОФ) 1.3 л/га вызвали синергический эффект усиления в 1.3–1.7 раза негативного воздействия смеси гербицидов на растения сахарной свеклы.

Ключевые слова: сахарная свекла, гербициды, фитотоксичность, факторы среды, продуктивность.

DOI: 10.31857/S0002188121040037

ВВЕДЕНИЕ

Сульфонилмочевина – химические соединения, которые широко применяют в сельском хозяйстве в борьбе с сорняками на зерновых культурах. Из-за невысокой стоимости этих препаратов они востребованы сельхозпроизводителями многих культур как за рубежом, так и в России. Сульфонилмочевина включает большое количество соединений, из которых более 35 обладают гербицидными свойствами [1]. Эти соединения наиболее эффективны на ранних стадиях развития сорняков (до 10 см высотой).

Помимо большого разнообразия сульфонилмочевинных соединений, в практике сельского хозяйства широкое распространение получили имидазолиноны, наиболее часто используемые для подавления сорняков в посевах зернобобовых культур. Имидазолиноны проникают через листья и корни и накапливаются в меристемной ткани, точках роста. Действующие вещества перемещаются как по флоэме, так и по ксилеме [2].

Сульфонилмочевина и имидазолиноны обладают общим механизмом действия на чувствительные к ним растения. Они связывают фермент ацетолактатсинтазу (АЛС), который отвечает за синтез аминокислот в хлоропластах. Угнетение фермента приводит к снижению количества аминокислот и подавлению синтеза незаменимых аминокислот – валина, лейцина и изолейцина. Нарушение биосинтеза аминокислот ведет к изменениям в синтезе белков и нуклеиновых кислот, вызывает хлороз ткани [3, 4].

В зависимости от степени проявления хлороза на листьях снижается интенсивность фотосинтеза растений. Торможение фотосинтеза под действием гербицидов замедляет синтез и транспорт сахарозы. Повреждение гербицидами корневой системы лимитирует поступление воды и питательных веществ. Ухудшение снабжения растений ассимилятами приводит к снижению интенсивности нарастания биомассы, а повреждение корневой системы – к подвяданию растений [5].

Токсичность гербицидов-ингибиторов АЛС в значительной степени зависит от температуры и влажности воздуха.

Во многих хозяйствах в севообороте размещают зерновые, зернобобовые культуры и сахарную свеклу, которые обрабатывают предназначенными для них гербицидами, используя одни и те же механизмы для наведения растворов. При этом небрежное отношение к санитарной обработке опрыскивателя или растворного узла в случае наведения раствора для другой культуры, такой как сахарная свекла, может заметно повлиять на ее продуктивность.

Цель работы – изучение влияния примесей различных гербицидов-ингибиторов АЛС в баке опрыскивателя при внесении их в смеси с гербицидами группы бетаналов на продуктивность сахарной свеклы. В задачи исследования входило: 1 – установить влияние примесей гербицидов-ингибиторов фермента АЛС (гранстара, ларена, пульсара, титуса) на показатели формирования посева (массу и густоту стояния растений) и урожайность сахарной свеклы в зависимости от фазы развития и погодных условий; 2 – изучить влияние загрязнения бака опрыскивателя остатками раствора гербицидов-ингибиторов АЛС после обработки зерновых культур при внесении их с препаратом бетанал Эксперт ОФ (БЭОФ) на продуктивность сахарной свеклы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили на опытном поле ВНИИСС в 2012–2019 гг. Объектом исследования служили растения сахарной свеклы в фазах семядолей–2-х пар настоящих листьев и различные гербициды-ингибиторы АЛС в сублетальных и изреживающих посев дозах. Расчет сублетальных и изреживающих доз испытанных гербицидов осуществляли по ранее приведенной методике [6]. В опытах растения сахарной свеклы повреждали гербицидами-сульфонилмочевинами в нормах 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 и 6.0% от нормы применения гранстара, ВДГ, 0.02 кг/га, ларена, ВДГ, 0.01 кг/га для озимой пшеницы (по каталогу) и препарата титус, СТС, 0.05 кг/га для кукурузы. Препарат пульсар, ВР (группа имидазолинонов) в опытах вносили в нормах 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 и 8.0% от нормы его применения для гороха (1.0 л/га). Почва опытного участка – чернозем выщелоченный малогумусный среднемощный тяжелосуглинистый. Схема опыта имела 50 вариантов в двукратной повторности. Площадь делянки 16.2 м², которую расщепляли пополам, затем на одной половине делянки вносили испытуемый герби-

цид, а на другой – испытуемый гербицид + БЭОФ 1.3 л/га. Опыт включал: варианты контроля с ручной прополкой и контроля с обработкой растений БЭОФ 1.3 л/га, варианты с гербицидами-ингибиторами АЛС (ручная прополка), варианты с гербицидами-ингибиторами АЛС + БЭОФ 1.3 л/га (остаточные и прораставшие сорняки удаляли вручную). Площадь расщепленной делянки – 8.1 м², учетной – 5.4 м², размещение делянок в опыте рендомизированное.

В опытах проведено однократное внесение гербицидов в вариантах. Гербициды вносили ранцевым опрыскивателем, оборудованным штангой с 6-ю распылителями на 6 рядков сахарной свеклы.

Сахарную свеклу возделывали в звене севооборота черный пар – озимая пшеница – сахарная свекла. Технология возделывания культур – общепринятая для ЦЧР.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Скорость проявления симптомов повреждения сахарной свеклы под действием гербицидов-ингибиторов АЛС зависела от фазы развития растений культуры, погодных условий и концентрации препаратов. Симптомы повреждения гербицидами проявлялись как в зоне внесения, так и в местах транспортировки препаратов вблизи точки роста молодых отравивших листьев. В дозах 1–2% от рекомендованных на культурах влияние гербицидов проявлялось в виде задержки роста и слабого хлороза, продолжительность которого была небольшой – окраска листьев восстанавливалась через 5–7 сут, растения возобновляли активный рост. В дозах 3–4% от нормы использования на предназначенной культуре гербициды, особенно гранстар, ларен и пульсар, вызывали резкое снижение нарастания биомассы растений культуры и устойчивый хлороз листьев. На отдельных растениях сахарной свеклы отмечено появление красноватой окантовки на листьях. В условиях благоприятной погоды большинство растений культуры восстанавливали рост и ассимиляцию углерода через 2–3 нед. Под влиянием наиболее высоких доз испытанных гербицидов частота повреждения сахарной свеклы с признаками антоциановой окраски листьев растений заметно возрастала. Сильный хлороз отрастающих молодых листьев и в точке роста приводил к гибели растений.

У менее поврежденных всходов сахарной свеклы из точки роста отрастали деформированные лимонно-желтого цвета листья. В условиях достаточной влаги интенсивнее отрастали обработанные гербицидами семядоли, черешки листьев,

новые деформированные листья. При недостатке влаги в почве и повышенной температуре воздуха прекращался рост растений, сворачивались в трубку листья, интенсивнее развивался хлороз с последующим некрозом ткани и отмиранием корневых волосков и корневой системы.

Обработанные листья сахарной свеклы приобрели матовый зеленый цвет, увеличивалась толщина листьев, сглаживался рисунок их жилкования. В течение 2-х нед после поражения гербицидами отмечали повышенную ломкость черешков и листьев сахарной свеклы на ветру. При изломе листьев отчетливо был слышен хруст, характерный для ломки тонкого стекла или тонких льдинок. Исследования подтвердили, что гербициды, обладающие сходством механизма действия, приводили к появлению сходных симптомов повреждения растений [5].

Наиболее быстро поражались гербицидами-ингибиторами АЛС растения сахарной свеклы в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев. Симптомы повреждения гербицидами сахарной свеклы в фазе 2-х пар настоящих листьев проявлялись через 2–3 сут после нанесения препарата на растения. В этом возрасте симптомы повреждения гербицидами на сахарной свекле были более отчетливыми. Хлорозом поражалась центральная часть розетки сахарной свеклы. В условиях недостатка влаги возрастали деформации листьев. Растения полегали, листья сворачивались.

Пораженные растения частично выпадали, посев изреживался. При высоких дозах гранстара сначала отмирали попавшие под обработку листья, затем процесс затрагивал растение в целом, изреженность посева в отсутствии осадков могла достигать 90%.

При слабом поражении гербицидами растения сахарной свеклы постепенно формировали листовую аппарат, способный эффективно ассимилировать углерод для процессов роста и развития организма. У сильно пострадавших, но выживших растений сахарной свеклы при формировании корнеплода иногда образовывалось несколько точек роста (например, под действием гранстара), из которых отрастал пучок листьев на тонких черешках. Листья были ланцетовидной формы и с меньшей площадью. При отрастании головки корнеплода легко было обнаружить до 5–7 точек роста листьев.

Исследованные гербициды группы сульфенилмочевин отличались разной фитотоксичностью для сахарной свеклы. Во влажных условиях произрастания с нарастанием малых норм гран-

стара и ларена от 1.0 до 6.0% от нормы применения, регламентированной по каталогу для озимой пшеницы, отмечено резкое снижение массы растений сахарной свеклы через 12 сут после внесения препаратов в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев. В отличие от выше приведенных препаратов фитотоксичность титуса в нормах от 1.0 до 6.0% от нормы внесения для кукурузы для растений сахарной свеклы была относительно слабо выражена (рис. 1–1А). Наиболее высокую токсичность на сахарной свекле проявлял гранстар, наименьшую – титус. Под действием малых доз гранстара нарастание биомассы растений сахарной свеклы снижалось на 11–82, ларена – на 3–54, титуса – на 1–14% к контролю без гербицидов.

В условиях недостатка влаги и высокой инсоляции токсичность гербицидов на растения сахарной свеклы в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев усиливалась, особенно при внесении относительно высоких доз гранстара и ларена (рис. 1–2А). Например, под действием гербицидов в дозах 3–6% от нормы расхода препаратов для озимой пшеницы нарастание биомассы сахарной свеклы снижалось в вариантах с гранстаром на 60–98, лареном – на 54–80, титусом (от нормы расхода для кукурузы) – на 9–28% в сравнении с контролем.

В условиях достаточной влагообеспеченности фитотоксичность гранстара и ларена для растений в фазе 2-х пар настоящих листьев по показателю динамики нарастания массы 100 растений была заметно меньше, чем для растений в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев (рис. 1, 1А). Их фитотоксичность для более взрослых растений была в 1.5–2.0 раза меньше фитотоксичности для растений в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев. Токсичность титуса для сахарной свеклы в фазе 2-х пар настоящих листьев по показателю массы 100 растений проявлялась при наиболее высоких дозах препарата и выражалась снижением массы на 8–10% в сравнении с контролем.

В засушливых условиях фитотоксичность гербицидов для растений сахарной свеклы в фазе 2-х пар настоящих листьев возрастала, но была заметно меньше, чем для растений, поврежденных в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев (рис. 1, 2А). Нарастание биомассы сахарной свеклы в фазе 2-х пар настоящих листьев в условиях засухи с увеличением дозы гранстара снижалось на 19–65, ларена – на 24–52, титуса – на 5–18%.

Под действием гербицидов растения сахарной свеклы частично выпадали, и посев изреживался в зависимости от токсичности препарата, обшир-

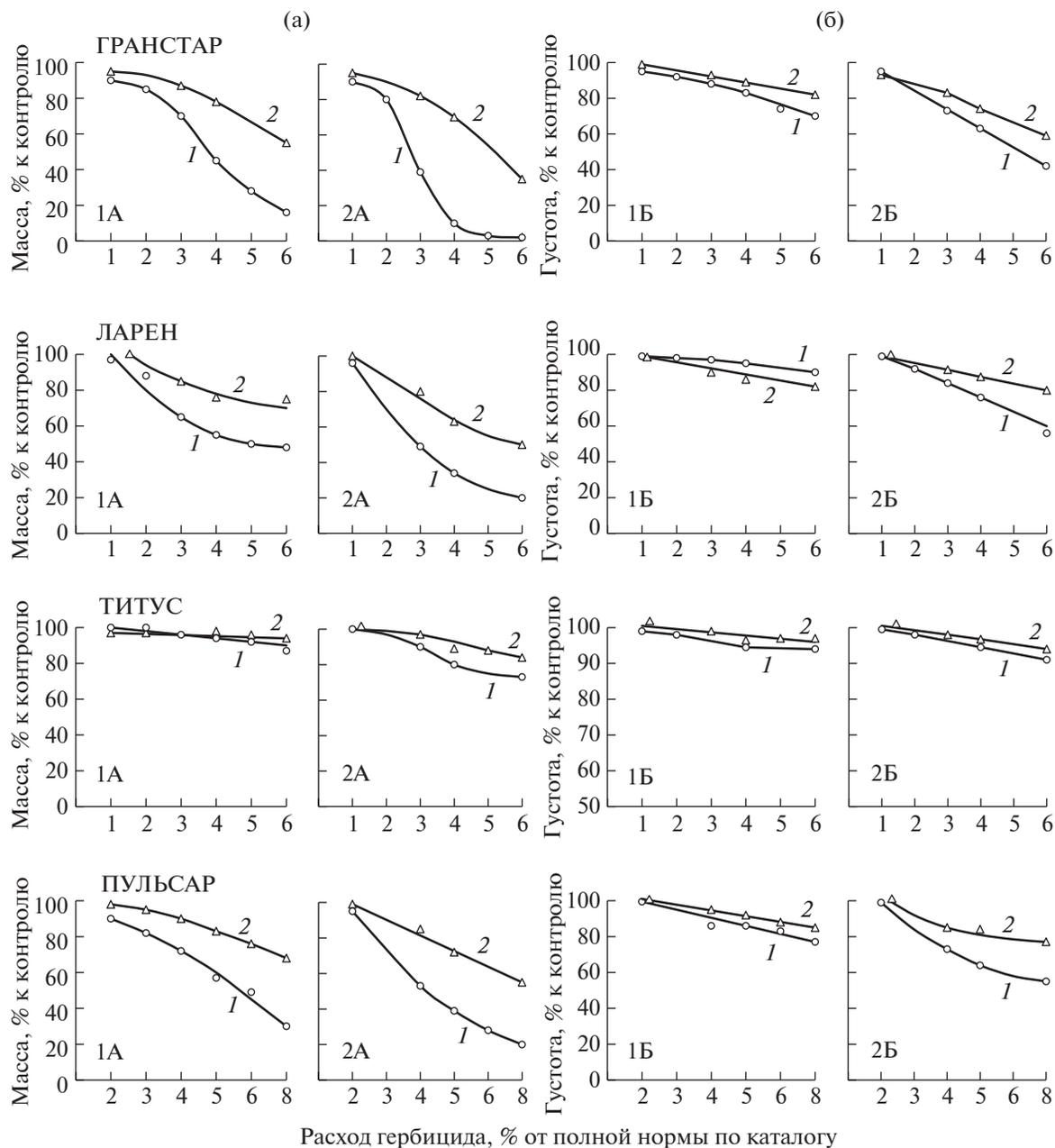


Рис. 1. Биомасса (а) через 12 сут и густота стояния (б) растений сахарной свеклы через 30 сут после обработки гербицидами. Зависимости от дозы гербицидов-ингибиторов АЛС (сульфонилмочевины, имидазолиноны), фазы развития растений и погодных условий: 1 – обработано в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев, 2 – в фазе 2-х пар настоящих листьев; 1А, 1Б – в условиях достаточной влаги в период обработок, 2А, 2Б – в условиях сухой жаркой погоды в период обработок.

ности повреждений и погодных условий. Как правило, изреженность посева сахарной свеклы была больше при повреждении сульфонилмочевиной культуры в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев, чем растений старшего возраста. Но если при прохождении растениями сахарной свеклы стадий роста, в которые их повреждали гербицидами-ингибиторами АЛС, происходила смена погоды от увлажненной к засушливой, то

выпад растений в фазе 2-х пар настоящих листьев мог быть больше, чем растений, поврежденных в раннем возрасте. Это происходило вследствие более быстрой адаптации к действию гербицидов растений, поврежденных в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев. Например, через 30 сут гранстар в наибольших дозах изреживал посев растений, поврежденных в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев, на 31%, в фазе развития

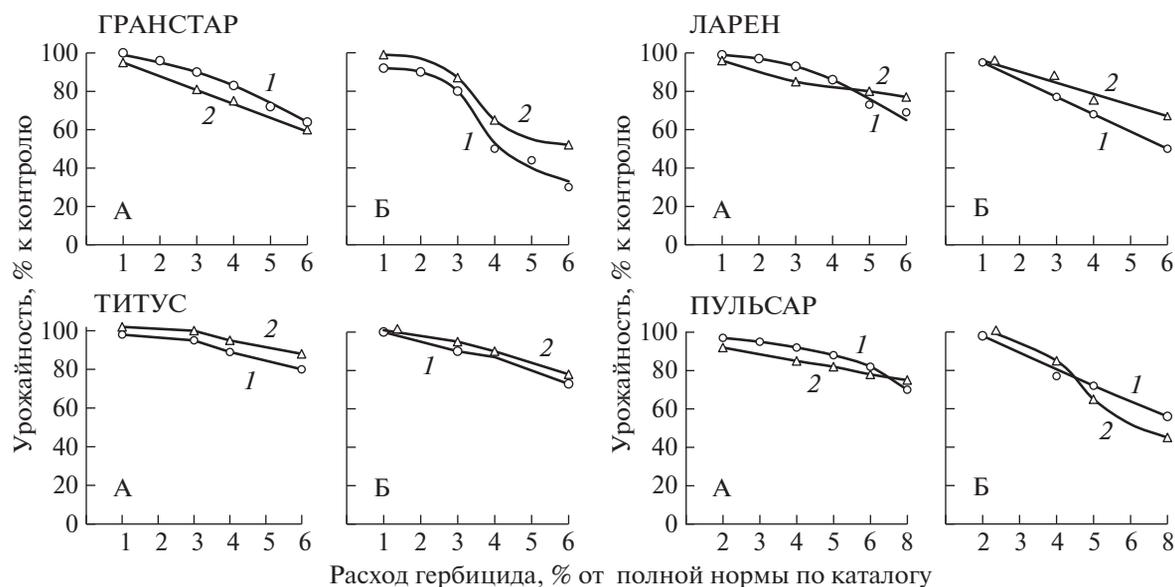


Рис. 2. Урожайность сахарной свеклы в зависимости от действия гербицидов-ингибиторов АЛС, фазы развития растений и погодных условий: 1 – обработано в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев, 2 – в фазе 2-х пар настоящих листьев; А – в условиях достаточной влаги в период обработок, Б – в условиях сухой жаркой погоды в период обработок.

2-х пар настоящих листьев – на 20%, тогда как Ларен сильнее изреживал посев растений, поврежденных в старшем возрасте (до 19%). Изреживание посева сахарной свеклы под действием титуса заметных изменений не претерпевало в зависимости от возраста обработанных растений и составляло 8–13% к контролю (рис. 1, 1Б).

В условиях длительного недостатка влаги и жаркой погоды выпад растений сахарной свеклы под действием сульфонилмочевин возрастал в 1.5–2.0 раза в сравнении с таким же возрастом растений в условиях оптимальной погоды. При этом особенно сильно страдали посевы, пораженные гербицидами в наиболее ранние фазы развития (рис. 1, 2Б).

Пульсар – соединение химического класса имидазолиноны по показателям токсичности (массы 100 растений и выпادا их на делянке) для сахарной свеклы в исследованных дозах был близок по действию с лареном в те же фазы развития культуры и погодных условиях.

В целом следует отметить, что при последующем установлении благоприятных условий для роста и развития культуры, растения, поврежденные гербицидами в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев быстрее восстанавливали физиологические функции, чем растения в фазе 2-х пар настоящих листьев. Поэтому в условиях достаточной влаги при сохранении в посеве густоты стояния растений >65 тыс. шт./га урожайность

сахарной свеклы менее страдала от повреждений гербицидами культуры в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев, особенно при низких дозах препаратов. В засушливых условиях более высокая урожайность посева сохранялась при повреждении растений гербицидами-ингибиторами АЛС в фазе 2-х пар настоящих листьев.

При благоприятных условиях погоды средние потери урожайности сахарной свеклы в вариантах с разными сроками повреждения ее гербицидами-ингибиторами АЛС в нормах 3–6% от нормы расхода для озимой пшеницы (гороха, кукурузы) составили от действия гранстара 18–38, ларена – 11–25, титуса – 6–18% (рис. 2А).

В засушливых условиях потери урожая сахарной свеклы от воздействия малых доз сульфонилмочевинных гербицидов заметно возрастали. Например, в выше приведенных дозах гранстар снижал урожайность корнеплодов в среднем в вариантах с разными сроками повреждения на 18–55, ларен – на 19–42, титус – на 8–23% (рис. 2Б). Пульсар по показателям влияния его на урожайность сахарной свеклы был близок к действию ларена на растения культуры в эти же фазы роста и развития. Торможение роста и развития в зависимости от токсичности препарата, изреживание посева являлись основными причинами снижения урожайности сахарной свеклы, поврежденной гербицидами-ингибиторами АЛС.

Таблица 1. Влияние гербицидов-ингибиторов АЛС на урожайность сахарной свеклы (2016–2018 гг.), т/га

Вариант	% от нормы расхода для культуры по каталогу				
	2.0	3.0	4.0	6.0	8.0
Обработка в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев					
1. Контроль (без гербицидов)	44.8				
2. Гранстар	42.8	37.0	30.2	17.0	–
3. Титус	43.6	42.2	41.2	35.7	–
4. Ларен	41.4	39.6	33.2	20.8	–
5. Пульсар	42.0	40.8	38.6	29.4	26.2
Обработка в фазе 2-х пар настоящих листьев					
1. Контроль (без гербицидов)	44.8				
2. Гранстар	41.0	40.6	28.6	21.4	–
3. Титус	43.2	42.5	39.0	37.4	–
4. Ларен	43.4	40.2	33.8	26.2	–
5. Пульсар	43.8	41.6	32.2	24.9	18.3
<i>НСР₀₅</i>			3.2		

Средние данные урожайности сахарной свеклы, учтенные за 3 года исследования с разными погодными условиями, согласовались выше приведенными результатами исследований в оценке реакции растений культуры на малые дозы гербицидов-ингибиторов АЛС (табл. 1).

В большинстве случаев растения сахарной свеклы повреждались остатками токсичных для нее гербицидов при наведении растворов в баке опрыскивателя или растворных узлах средств защиты, примененных на этой культуре. Сульфонилмочевины и имидазолиноны, являясь сильными биологически активными веществами, могут в малых количествах проявлять синергическое повреждающее действие на чувствительные культуры в смесях с другими химическими веществами [3]. Поэтому даже незначительное количество гербицидов, предназначенных для применения на зерновых культурах, их остатки в баке, в шлангах, фильтрах могут оказать негативное влияние на рост и развитие сахарной свеклы при смешивании с другими препаратами, например с бетаналами.

Например, под действием смеси БЭОФ 1.3 л/га с остатками в баке опрыскивателя гербицидов-ингибиторов АЛС отмечали более сильное угнетение растений сахарной свеклы, возрастала доля необратимых повреждений, от которых растения были не способны восстановиться. Вследствие этого негативное действие остатков этой группы гербицидов в растворе с БЭОФ 1.3 л/га на продуктивность сахарной свеклы увеличивалось в 1.3–1.7 раза в сравнении с действием только остатков

гербицидов-ингибиторов АЛС в баке опрыскивателя после полной заправки емкости водой (табл. 2). Эффект синергии от смеси гербицидов вызывал увеличение потерь урожайности и сахаристости корнеплодов. Расчетный сбор сахара снижался на 9.5–18.2% при наличии в растворе БЭОФ и остатков гербицидов-ингибиторов АЛС в дозе 2% от нормы применения на предназначенной культуре и на 12.9–32% – в дозе 3%.

Наличие остатков токсичных для сахарной свеклы гербицидов-ингибиторов АЛС при обработке посева бетаналами приводило к значительным потерям продукции, что свидетельствовало о необходимости тщательного соблюдения правил подготовки оборудования, предназначенного для наведения растворов и опрыскивания сельскохозяйственных культур химическими средствами защиты растений.

Представленные данные позволят специалистам свеклосахарного производства оценить тяжесть последствий от интоксикации сахарной свеклы гербицидами-ингибиторами АЛС и обозначить потери продукции при возмещении убытка в случае страхования посева.

ВЫВОДЫ

1. Гербициды-ингибиторы АЛС (гранстар, ларен, титус, пульсар) в малых дозах подавляли у чувствительных к ним растений сахарной свеклы нарастание биомассы 100 растений, изреживали посев, снижали продуктивность культуры в зависимости от количества загрязнителя в баке опрыскивателя. Нарушение роста и развития рас-

Таблица 2. Снижение продуктивности сахарной свеклы (% к контролю) в зависимости от фитотоксичности смеси БЭОФ 1.3 л/га с остатками различных гербицидов-ингибиторов АЛС в баке опрыскивателя (гербициды вносили в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев, среднее за 2017–2019 гг.)

Гербициды, % от нормы расхода на культуре по каталогу	Снижение показателей продуктивности, % к контролю с ручной прополкой					
	без применения БЭОФ (с ручной прополкой)			с применением БЭОФ (с дополнительной ручной прополкой)		
	урожайность	сахаристость	сбор сахара	урожайность	сахаристость	сбор сахара
1. Контроль с ручной прополкой	55.4	15.2	8.4	–	–	–
2. БЭОФ 1.3 л/га (с дополнительной ручной прополкой)	–	–	–	55.1	15.1	8.3
3. Гранстар 2.0%	8.6	3.3	11.4	14.4	4.6	18.2
4. Титус 2.0%	4.8	2.6	7.2	6.7	3.3	9.5
5. Ларен 2.0%	7.3	3.3	10.0	10.6	4.0	14.0
6. Пульсар 2.0%	8.3	4.0	11.7	11.7	4.6	15.6
7. Гранстар 3.0%	14.7	4.6	18.4	28.0	6.0	32.0
8. Титус 3.0%	6.9	4.0	10.4	8.8	4.6	12.9
9. Ларен 3.0%	11.4	3.3	14.0	21.8	5.3	25.7
10. Пульсар 4.0%	9.8	4.0	13.2	16.2	5.3	21.2
<i>HCP</i> ₀₅	6.5	2.2	6.1	6.5	2.2	6.1

Примечание. В вариантах 1 и 2 представлены абсолютные показатели продуктивности сахарной свеклы (т/га, %, т/га).

тений культуры в раннем возрасте сопровождалось проявлениями симптомов повреждения – прекращением роста, хлорозом, красной окантовкой листьев, увеличением толщины листьев, характерной ломкостью черешков и листа, похожих на хруст тонкого стекла или льдинок, некрозом тканей, сильной деформацией новых отрастающих листьев. Примеси гербицидов-ингибиторов АЛС в баке опрыскивателя при обработке сахарной свеклы БЭОФ 1.3 л/га вызывали синергический эффект усиления негативного воздействия смеси гербицидов на растения сахарной свеклы.

2. В оптимальных условиях произрастания гербициды-ингибиторы АЛС в нормах 1–6% от нормы расхода для озимой пшеницы, кукурузы (2–8% от нормы расхода для гороха) через 12 сут снижали нарастание биомассы растений сахарной свеклы, поврежденных в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев: гранстар – на 11–82, ларен – на 3–54, пульсар – на 4–35, титус – на 1–14% к контролю без гербицидов. Для растений сахарной свеклы в фазе 2-х пар настоящих листьев фитотоксичность этих гербицидов была в 1.5–2.0 раза меньше от фитотоксичности на растениях в ранней фазе развития.

В засушливых условиях погоды токсичность гербицидов-ингибиторов АЛС на растения сахар-

ной свеклы усиливалась, особенно с увеличением нормы от 3 до 6% от нормы расхода для озимой пшеницы (кукурузы, гороха). Для растений сахарной свеклы в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев гранстар снижал нарастание биомассы на 60–98, ларен – на 54–80, пульсар – на 46–74, титус – на 9–28% в сравнении с контролем. Нарастание биомассы сахарной свеклы, поврежденной гербицидами в фазе 2-х пар настоящих листьев, под действием гранстара снижалось на 19–65, ларена – на 24–52, пульсара – на 17–38, титуса – на 5–18% к контролю.

3. Под действием исследованных норм гербицидов-ингибиторов АЛС растения сахарной свеклы частично выпадали, и посев изреживался в зависимости от токсичности препарата и погодных условий. Более сильный выпад растений чаще отмечали на делянках с повреждениями культуры в фазе семядолей–1-й пары настоящих листьев. В условиях оптимального увлажнения средняя изреженность посева в вариантах с разными сроками повреждения сахарной свеклы под действием гранстара достигала 26, ларена – 15, пульсара – 17, титуса – 10% к контролю. В засушливых условиях изреженность посева сахарной свеклы под действием гербицидов возрастала в 1.7–2.0 раза.

4. Гербициды-ингибиторы АЛС снижали урожайность сахарной свеклы в зависимости от нормы препаратов: гранстар > ларен ≥ пульсар > титус. При благоприятных условиях погоды средние потери урожайности сахарной свеклы в вариантах с разными сроками повреждения ее гербицидами-ингибиторами АЛС в нормах 3–6% от нормы расхода для озимой пшеницы (гороха, кукурузы) составили: от действия гранстара 18–38, ларена – 11–25, пульсара – 10–19, титуса – 6–18%. В засушливых условиях гранстар в тех же нормах снижал урожайность сахарной свеклы на 18–55, ларен – на 19–42, пульсар – на 8–40, титус – на 8–23% в сравнении с контролем.

5. Наличие остатков раствора гербицидов-ингибиторов АЛС в баке опрыскивателя при обработке посева сахарной свеклы БЭОФ 1.3 л/га увеличивало потери расчетного сбора сахара культуры в 1.3–1.7 раза в сравнении с действием только остатков этих гербицидов в баке опрыскивателя после полной заправки емкости водой. Расчетный сбор сахара снижался на 9.5–18.2% при наличии в растворе БЭОФ остатков гербицидов-ингибиторов АЛС в норме 2% от нормы примене-

ния на предназначенной культуре и на 12.9–32% – в дозе 3%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спиридонов Ю.Я., Жемчужин С.Г. Современные проблемы изучения гербицидов (2006–2008) // Агрохимия. 2010. № 7. С. 73–91.
2. Спиридонов Ю.Я., Ларина Г.Е. Рекомендации по применению имидазолиновых гербицидов в посевах зернобобовых культур в России. М.: БАСФ–ВНИИФ, 2003. 94 с.
3. Куликова Н.А., Лебедева Г.Ф. Гербициды и экологические аспекты их применения. М.: Книжн. дом “Либроком”, 2010. 152 с.
4. Кошкин Е.И. Патофизиология сельскохозяйственных культур. М.: Проспект, 2016. 359 с.
5. Спиридонов Ю.Я. К вопросу о последствии сульфонилмочевинных гербицидов в почвах РФ и пути снижения их отрицательного действия на культурные растения // Вестн. защиты раст. 2009. № 3. С. 10–19.
6. Дворянкин Е.А. Методология оценки повреждений сахарной свеклы токсичными гербицидами, применяемыми на других культурах // Сахар. 2019. № 12. С. 32–35.

Influence of a Sprayer Pollution with Sulfonyl-Urea and Imidazolinone Residuals on Sugar Beet Productivity

E. A. Dvoryankin

A. L. Mazlumov All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar
p. VNIISS 86, Ramonsky district, Voronezh region, 396030, Russia
E-mail: dvoryankin149@gmail.com

In the experimental field of the All-Russian Research Institute of Sugar Beet and Sugar, long-term field trials testing effect of sublethal and reducing plant density doses of herbicides – inhibitors of acetolactatesynthase (ALS) enzyme on sugar beet plants depending on the crop development stage and weather conditions were conducted. Influence of herbicides on sugar beet at early stages of growth and development were estimated by indices of mass increase and plant density reduction. The crop yield was calculated by quantity-weight method using VENEMA production line to determine sugar content. The herbicides – inhibitors of ALS (Granstar, Laren, Titus, and Pulsar) in small doses inhibited mass increase of 100 sugar beet plants, reduced plant density, and decreased sugar beet productivity depending on quantity of herbicide admixtures. Disorder of the crop plant growth and development was accompanied by appearing symptoms of damage: growth stop, chlorosis, red colour of leaf edge, increased thickness of leaves, specific petiole and leaf fragility, and necrosis of tissues. When applying Betanal Expert OF (BEOF) for sugar beet (1/3 l/ha), admixtures of herbicides – ALS inhibitors in a sprayer tank caused a synergetic effect 1.3–1.7-fold enhancing negative influence of the herbicides' mixture on sugar beet plants.

Key words: sugar beet, herbicides, phytotoxicity, environment factors, productivity.

УДК 631.559:632.112:546.47:631.811.1

РЕГУЛИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ (*Triticum aestivum* L.) ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА ВЛАГИ В ПОЧВЕ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ МОЛИБДЕНА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УРОВНЯ АЗОТНОГО ПИТАНИЯ

© 2021 г. И. И. Серегина^{1,*}, Н. Т. Ниловская²

¹ Российский государственный аграрный университет—МСХА им. К.А. Тимирязева
127550 Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127550 Москва, ул. Прянишникова, 31, Россия

*E-mail: seregina.i@inbox.ru

Поступила в редакцию 12.08.2020 г.

После доработки 11.11.2020 г.

Принята к публикации 11.01.2021 г.

В модельных экспериментах в почвенной культуре был изучен способ регулирования урожайности яровой пшеницы в условиях оптимального водообеспечения и засухи путем применения молибдена при варьировании азотного питания. Установлено, что применение предпосевной обработки семян молибденом способствовало улучшению условий формирования репродуктивной сферы растений, что определило увеличение урожайности пшеницы в условиях оптимального водообеспечения. В условиях краткосрочной почвенной засухи молибден стабилизировал процессы формирования зерен, что привело к увеличению доли реализации цветков в зерна и возрастанию озерненности колоса. Было установлено, что применение молибдена при выращивании растений в условиях краткосрочной почвенной засухи способствовало активизации процессов поступления азота в растения, а также более эффективному перераспределению азота между органами и его накоплению преимущественно в агрономически ценной части урожая пшеницы. Это способствовало улучшению поступления в растения азота в периоды до наступления засухи, сохранению жизнеспособности растений пшеницы во время воздействия дефицита влаги в почве, затем активизировало отток ассимилятов из вегетативной части в репродуктивные органы. Данные процессы увеличивали устойчивость растений пшеницы к водному стрессу в критический период их роста, что определило увеличение урожайности зерна яровой пшеницы.

Ключевые слова: предпосевная обработка семян молибденом, яровая пшеница, засуха в критический период роста растений.

DOI: 10.31857/S0002188121040141

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время известна физиолого-биохимическая роль молибдена, которая обусловлена его участием в азотном обмене растений. Недостаток молибдена нарушает обмен углеводов и органических кислот, что может быть результатом торможения процессов их синтеза и снижением эффективности процессов дыхания [1–3].

Было установлено, что молибден не только способствует увеличению содержания сырого протеина в зерне зернобобовых культур, но также улучшает его качество за счет возрастания водорастворимой фракции белка [1].

В научной литературе было показано, что молибден способствует снижению отрицательного

действия краткосрочного недостатка влаги на рост и урожайность растений [4]. В условиях недостатка влаги в почве отмечено положительное действие молибдена на активность нитратредуктазы и АТФ-азы. При этом повышается также активность глутаматдегидрогеназы и глутаматсинтеза [5, 6]. Было выявлено, что в результате воздействия водного дефицита на растения в клетках накапливается большое количество аммиака, что может быть проявлением одной из многочисленных стрессовых реакций, активизирующих повреждение мембран клеток. Защитная роль молибдена в этих условиях проявляется путем связывания аммиака, в результате чего возрастает содержание свободных аминокислот [7]. Это, ве-

роятно, способствует снижению повреждения мембран и возрастанию водоудерживающей способности тканей при применении молибденовых удобрений [8]. При этом было показано увеличение содержания азотсодержащих органических соединений в различных органах растений зерновых культур [4, 8], что свидетельствует, по мнению авторов, о повышении устойчивости растений к негативному воздействию засухи в критический период роста растений.

Содержание тех или иных элементов в растениях также зависит от многих факторов. Установлено, что наибольшей потребностью в молибдене обладают бобовые и капустные, а также некоторые овощные культуры [2, 3, 9, 10]. Обычно дефицит Мо в растениях проявляется при его концентрации в тканях листьев 0.1–0.3 мг/кг сухой массы. Нормальным содержанием в растениях считается 20–300 мг Мо/кг, >300 мг – токсичным [11]. В исследованиях с различными сортами сои содержание молибдена находилось в пределах 0.9–10.2 мг/кг. При этом применение молибденовых удобрений способствовало увеличению содержания элемента в растениях с 0.92 до 291 мг/кг [12].

Почвенно-климатические условия выращивания культур оказывают наибольшее влияние на содержание молибдена в растениеводческой продукции. Было отмечено существенное влияние в первую очередь элементного состава и свойств почвы в зоне выращивания культуры [13, 14]. Состояние водного режима почв также оказывает большое влияние на накопление молибдена в продукции растениеводства, но этот вопрос до настоящего времени мало изучен.

Известно, что на формирование и величину продуктивности растений, как правило, влияет комплекс факторов, которые действуют на растения одновременно, вызывая нежелательные реакции и ограничивая получение высоких урожаев сельскохозяйственных культур. Таким образом, можно сделать вывод, что до настоящего времени проведено больше количество научных работ, посвященных изучению действия молибдена на урожайность и химический состав полученного урожая. Однако мало изученными остаются отдельные аспекты влияния молибдена на формирование зерновой продуктивности яровой пшеницы, выращиваемой в условиях неустойчивого водообеспечения в критический период ее роста при варьировании уровней азотного питания. При этом вопросы влияния молибдена на накопление элемента растениями пшеницы и распределения между различными органами в зависимости от условий азотного питания и водообеспечения остаются малоизученными и в связи с этим

приобретают большую актуальность и практическую значимость.

Цель работы – изучение влияния способов применения молибденовокислого аммония на формирование урожайности и химический состав яровой пшеницы при варьировании уровня азотного питания в условиях оптимального водообеспечения и дефицита влаги в почве в критический период роста растений.

В задачи исследований входило изучение следующих вопросов: влияние молибдена на урожайность яровой пшеницы сорта Иволга в зависимости от условий азотного питания и водообеспечения, влияние предпосевной обработки семян молибденом на формирование элементов продуктивности растений пшеницы в зависимости от условий выращивания, взаимное влияние молибдена и почвенного азота на поступление элементов в растения и накопление их в основной и побочной продукции в изученных условиях выращивания.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленных задач было проведено 2 вегетационных опыта. Опыт 1 проведен в вегетационном домике кафедры агрономической и биологической химии и радиологии РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева. Опыт 2 проведен в фитотронной установке лаборатории физиологии питания и продуктивности растений ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова. В фитотронной установке растения выращивали в регулируемых условиях освещения и температуры. Поддерживали постоянные световые условия 16-часового светового дня. Источником света в установке служили лампы ЗН-8 мощностью 500 Вт, помещенные в водяной экран. Температурный режим при выращивании растений в световой период составлял 23–24°C и в темновой период – 18–20°C.

Закладку опытов в почвенной культуре осуществляли в соответствии с методикой [15]. Объектом исследования была яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.) сорта Иволга. Пшеница мягкая яровая сорт Иволга выведена в Московской сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева, является высокобелковым сортом и используется на фуражные цели. Этот сорт требователен к содержанию влаги в почве, особенно в критические периоды роста: выход в трубку–колошение, цветение–начало молочной спелости [16].

В опытах 1 и 2 растения выращивали в сосудах Вагнера емкостью 5 кг почвы. Для опытов использовали дерново-подзолистую среднесуглинистую почву. Агрохимические показатели поч-

вы определяли по общепринятым методикам [17]. Содержание гумуса составляло 1.8% (по Тюрину), pH_{KCl} 6.7 (потенциометрический метод в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26483-91), H_r – 0.5 мг-экв/100 г почвы (по Каппену), S – 13.5 мг-экв/100 г почвы (по Каппену–Гильковицу, ГОСТ 27821-88), V – 96%. Обеспеченность подвижными формами фосфора и калия составляла 278 и 280 мг/кг почвы соответственно (по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО (ГОСТ 26207-91). Содержание подвижного молибдена было равно 0.28 мг/кг почвы (ГОСТ Р 50689-84, в вытяжке оксалатным буферным раствором).

В опытах создавали разные уровни азотного питания растений пшеницы. Перед набивкой сосудов в почву вносили химически чистые соли NH_4NO_3 , KH_2PO_4 и KCl . Уровни азотного питания: N_1 – 50, N_2 – 150, N_3 – 300 мг/кг почвы. Уровень фосфора и калия создавали из расчета 300 мг/кг почвы каждого из элементов.

В опытах моделировали оптимальные условия водообеспечения и дефицит влаги в почве (засуху). Оптимальное водообеспечение растений создавали путем полива сосудов по массе до 60% ПВ в течение всего вегетационного периода. Засуху “северного типа”, характерную для умеренных широт Нечерноземной зоны, создавали путем прекращения полива растений на VI этапе органогенеза до наступления в почве влажности устойчивого завядания растений (14% ПВ). Длительность засухи составляла 6–7 сут. После окончания засухи постепенно возобновляли полив растений [18].

Предпосевную обработку семян молибденом проводили путем намачивания семян в 4%-ном растворе молибденовокислого аммония $((NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O, 52\% Mo)$ из расчета 5% раствора от массы семян. В контрольных вариантах семена обрабатывали дистиллированной водой. Посев предварительно подготовленными семенами проводили по 30 шт. на сосуд с последующим прореживанием в фазе кушения до 20 шт.

Для изучения формирования элементов продуктивности в фазе выхода в трубку проводили учет числа заложившихся зачаточных цветков на конусе нарастания, используя микроскоп МБС-19. Для расчета доли (в %) реализации цветков в зерна учитывали число зерен в колоссе на XII этапе в фазе полной спелости зерна и число цветков, образовавшихся на VI этапе органогенеза в фазе выхода в трубку, принимая последний показатель за 100%.

Уборку урожая проводили при достижении растениями пшеницы фазы полной спелости.

После уборки урожая анализировали формирование элементов продуктивности – число зерен и колосков в колосе. Оценивали урожай растений в вариантах опыта (г/сосуд) и структуру урожая: долю зерна, соломы и половы (в % от массы надземной части растений, которая составляла 100%).

Для оценки химического состава зерна и соломы растений пшеницы определяли содержание общего азота методом Кьельдаля [17]. Для определения содержания молибдена в зерне и соломе растений пшеницы проводили анализ растительных образцов на масс-спектрометре с ионизацией в индуктивно-связной плазме “VG PLASMA QUAD PG 2 TURBO” (Англия) после мокрого озоления с помощью микроволновой системы “MDS-2000” (США) с использованием кислот HNO_3 (70%) и HCl (37%).

Все данные исследования подвергали статистической обработке путем использования показателя наименьшей существенной разности (НСР) с 5%-ным уровнем значимости [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изучено влияние предпосевной обработки семян молибденом на величину урожайности и формирование элементов продуктивности яровой пшеницы сорта Иволга при варьировании уровня азотного питания в зависимости от условий водообеспечения (табл. 1). При оптимальном водообеспечении растений обработка семян молибденом способствовала достоверному увеличению урожая зерна при всех уровнях азотного питания. Выявлено возрастание массы зерна при низкой дозе (N_1) азота в 1.41 раза, при средней (N_2) – на 10%, при высокой (N_3) – в 1.48 раза в опыте в вегетационном домике и в 1.12 раза в опыте в фитотроне.

Известно, что уже в период закладки и развития цветков на конусе нарастания главного побега (V–VI этапы органогенеза) можно предположить уровень потенциальной продуктивности растений. Анализ полученных результатов показал, что обработка семян молибденом способствовала увеличению числа цветков при низком уровне азота (N_1) с 56 до 66 шт., при среднем (N_2) – изменения были недостоверными, при высоком (N_3) – с 59 до 70 шт. в опыте в вегетационном домике и с 70 до 75 шт. в опыте в фитотроне. Отмечено, что число зачаточных цветков, заложившихся на конусе нарастания, зависело от уровня азотного питания и было наибольшим на фоне высокой дозы азота (N_3). Выявлено, что при использовании предпосевной обработки семян мо-

Таблица 1. Влияние молибдена на урожайность яровой пшеницы в условиях оптимального водообеспечения и засухи

Вариант		Оптимальное водообеспечение				Краткосрочная почвенная засуха				
		Масса зерна, г/сосуд	Число, шт./растение		Доля реализации зачаточных цветков в зерна, %	Масса 1000 зерен, г	Масса зерна, г/сосуд	Число зерен, шт./растение	Доля реализации зачаточных цветков в зерна, %	Масса 1000 зерен, г
доза азота, мг/кг почвы	предпосевная обработка семян		зачаточных цветков	зерен						
Опыт 1 в вегетационном домике										
150	Без обработки	3.3	56	18	32.1	21.0	1.8	8	14.3	19.4
	Mo	4.7	66	25	37.9	21.0	1.8	8	12.1	19.4
300	Без обработки	3.3	59	20	33.9	20.5	0.8	2	3.4	20.0
	Mo	4.9	70	29	41.4	20.9	2.1	8	11.4	21.4
<i>HCP</i> ₀₅		0.7	2	2		2.4	0.2	2		2.4
Опыт 2 в фитотронной установке										
150	Без обработки	12.0	68	29	42.6	28.2	3.0	6	8.8	27.8
	Mo	13.2	70	31	44.3	28.4	3.6	8	11.4	33.1
300	Без обработки	12.9	70	32	45.7	26.8	1.8	7	10.0	20.0
	Mo	14.4	75	34	45.3	28.5	8.0	15	20.0	44.3
<i>HCP</i> ₀₅		1.0	4	2		2.3	0.5	2		3.2

Примечание. Без обработки – контроль. То же в табл. 2–4.

либденом возрастала доля реализации цветков в зерна, что оказало влияние на озерненность колоса и способствовало возрастанию урожая зерна пшеницы. Следует отметить, что при оптимальном водообеспечении применение молибдена способствовало увеличению количества зерновок в главном колосе в 1.38 и 1.45 раза при применении доз N_1 и N_3 в условиях вегетационного домика и на 6% в условиях фитотронной установки. При этом масса 1000 зерен не изменилась в обоих опытах. Показано, что увеличение урожая пшеницы при применении предпосевной обработки семян молибденом в оптимальных условиях водообеспечения произошло в основном за счет роста озерненности колоса, т.е. его действие было направлено на формирование большего количества зачаточных цветков и активизацию процессов реализации цветков в зерна.

Оценка величины урожая пшеницы, выращенной в условиях краткосрочной почвенной засухи, показала резкое снижение массы зерна во всех вариантах опыта. Урожайность пшеницы в контроле при низкой дозе азота (N_1) уменьшилась в 1.8 раза, при средней (N_2) – в 6 раз, при высокой дозе азота (N_3) – более чем в 4 раза в вегетационном домике и более чем в 7 раз в фитотро-

не. Следует отметить, что наибольшее снижение массы зерна было получено при высокой дозе азота, что определялось резким уменьшением количества зерен – более чем в 2 раза. Применение молибдена для предпосевной обработки семян в этих условиях способствовало снижению негативного действия стрессовых реакций, возникавших при дефиците влаги в почве. Показано, что эффективность молибдена зависела от дозы азота. Наибольший положительный эффект был получен на фоне высокого уровня азотного питания. Отмечено возрастание массы зерна в 2.8 раза в опыте в вегетационном домике и в 4.4 раза в опыте в фитотроне.

Изучение вопроса формирования элементов продуктивности показало, что в условиях водного стресса в критический период роста растений резко снижалась доля реализации зачаточных цветков в зерна в результате их недоразвития и большого сброса. Это и обусловило резкое уменьшение количества зерновок в колосе. В исследовании [19] было показано, что засуха сокращает продолжительность вегетационного периода. При этом уменьшается число вегетационных ме-тамеров главного побега (в среднем на один ярус)

Таблица 2. Влияние молибдена на структуру урожая растений пшеницы в зависимости от уровня азотного питания и условий водообеспечения

Вариант		Оптимальное водообеспечение		Краткосрочная почвенная засуха	
доза азота, мг/кг почвы	предпосевная обработка семян	доля соломы	доля зерна	доля соломы	доля зерна
		% от надземной массы растений			
Опыт в вегетационном домике					
150	Без обработки	70	30	74	26
	Mo	62	38	77	23
300	Без обработки	75	25	89	11
	Mo	67	33	77	23
Опыт в фитотронной установке					
150	Без обработки	58	42	76	24
	Mo	52	48	78	22
300	Без обработки	57	43	86	14
	Mo	51	49	64	36

и ухудшается рост боковых побегов, быстрее отмирают вегетативные органы в конце вегетации.

Применение молибдена в вариантах с краткосрочной почвенной засухой на фоне низкой дозы азота (N_1) не оказало положительного влияния на уровень реализации цветочных зачатков в зерновки. По-видимому, редукция цветков в данных условиях была обусловлена не только воздействием стрессовых реакций, вызванных засухой, но и недостатком азота, а также торможением процессов его поступления в растения.

На фоне средней (N_2) и высокой (N_3) доз азота молибден способствовал увеличению доли реализации цветков до 11–20%, что привело к увеличению количества зерен в колосе. Это способствовало получению возможного уровня урожая яровой пшеницы в данных условиях выращивания. Авторами [20] было показано, что молибден способствует улучшению условий для закладки и развития цветочных зачатков в условиях высокого обеспечения растений азотом. Результаты, полученные в наших экспериментах, позволили сделать вывод, что на фоне средней и высокой доз азота в результате удлинения продолжительности периода развития конуса нарастания и закладки цветочных зачатков молибден способствовал нормальному развитию более поздним цветкам, которые формировались на конусе нарастания уже после окончания засушливого периода. По-видимому, одним из механизмов действия молибдена при выращивании растений в условиях дефицита влаги в почве в критический период их роста является способность улучшать условия закладки и развития цветочных зачатков на конусе нарастания главного побега. В результате этого

происходит увеличение доли реализации зачаточных цветков в зерна, что способствует увеличению озерненности колоса и соответственно урожайности пшеницы. При использовании обработки семян пшеницы сорта Иволга молибденом на фоне N_2 количество зерен увеличилось с 6 до 8 шт. на главном колосе, на фоне N_3 увеличение числа зерен составило от 2 до 8 шт. в условиях вегетационного домика и с 7 до 15 шт. в условиях фитотрона. Отмечено, что в опыте, проведенном в фитотронной установке, формирование урожая пшеницы при применении молибдена было обусловлено не только количеством зерновок, но также и массой 1000 зерен, которая возросла в 1.19 раза при N_2 и более чем в 2 раза при N_3 . Это свидетельствовало о влиянии молибдена в условиях засухи не только на репродуктивную функцию колоса, но также и на аттрагирующую способность колоса, в результате чего активизировались процессы оттока ассимилятов из вегетативных органов в генеративные.

В проведенных опытах изучено влияние молибдена на структуру урожая яровой пшеницы в изученных условиях (табл. 2). При выращивании растений пшеницы в условиях оптимального водообеспечения в течение всего вегетационного периода отмечено перераспределение структуры урожая в сторону роста доли зерна и уменьшения доли соломы при всех уровнях азотного питания. Показано увеличение доли зерна в структуре урожая пшеницы при низкой дозе азота N_1 с 30 до 38%, при средней дозе азота N_2 – с 42 до 48%, при высокой дозе – с 25 до 33% при выращивании растений в условиях вегетационного опыта и с 43 до 49% при выращивании растений в фитотроне.

Во всех вариантах применения молибдена выявлено уменьшение доли соломы.

Показано, что в условиях засухи с увеличением уровня азотного питания происходило возрастание доли соломы в структуре надземной массы растений. При этом доля зерна существенно снижалась до 11–14%. При использовании обработки семян молибденом в условиях высокого обеспечения растений азотом наблюдали снижение негативного действия дефицита влаги в почве на структуру урожая пшеницы. Показано возрастание доли зерна до 23–36% в структуре надземной массы растений пшеницы за счет снижения доли соломы до 77–64%.

Таким образом, можно сделать вывод, что применение предпосевной обработки семян молибденом повышало устойчивость растений пшеницы к водному стрессу, снижая негативное действие дефицита влаги в почве в критический период роста растений, и положительно влияло на формирование элементов продуктивности и величину урожая. Установлено, что важным условием получения максимального эффекта при применении молибдена было высокое обеспечение растений азотом. В этих условиях применение молибдена существенно удлиняло период развития конуса нарастания и улучшило условия формирования зачаточных цветков, что и определило получение более высокого урожая зерна в этих вариантах по сравнению с контролем.

На процессы поступления и размеры накопления элементов питания влияют в первую очередь условия минерального питания и погодно-климатические условия. Результаты исследования, проведенного в фитотронной установке, по изучению влияния молибдена на вынос азота урожаем яровой пшеницы при варьировании уровня азотного питания и условий водообеспечения представлены в табл. 3. Показано, что при увеличении уровня азотного питания в оптимальных условиях увлажнения почвы происходило возрастание общего выноса азота урожаем яровой пшеницы с 754 до 857 мг/сосуд. При этом вынос азота урожаем зерна в варианте N₃ возрос до 595 против 482 мг/сосуд в варианте N₂, что было обусловлено ростом урожая.

Применение молибдена в данных условиях водообеспечения на фоне дозы N₂ способствовало снижению выноса общего азота урожаем пшеницы на 15%: с 754 до 654 мг/сосуд. Вынос азота урожаем зерна снизился на 4, урожаем соломы – на 41%. Снижение выноса азота урожаем зерна, по видимому, было обусловлено эффектом разбавления, а резкое уменьшение выноса азота урожа-

Таблица 3. Влияние молибдена на вынос азота растениями яровой пшеницы, мг/сосуд

Вариант		Зерно	Солома	Надземная часть растения
доза азота, мг/кг почвы	обработка семян			
Оптимальные условия водообеспечения				
150	Без обработки	482	272	754
	Mo	462	192	654
300	Без обработки	595	263	857
	Mo	603	263	866
Краткосрочная почвенная засуха				
150	Без обработки	123.6	146	269
	Mo	129.6	277	406
300	Без обработки	79.9	238	318
	Mo	316.4	254	571

ем соломы связано в основном с уменьшением доли соломы в структуре надземной массы пшеницы. На фоне дозы N₃ применение молибдена привело к незначительному увеличению выноса общего азота хозяйственным урожаем пшеницы и урожаем зерна.

В условиях воздействия на растения краткосрочной почвенной засухи отмечено резкое снижение процессов поступления азота в растения. Общий вынос азота снизился до 269 мг/сосуд при дозе N₂ и до 318 мг/сосуд при дозе N₃ по сравнению с оптимальным водообеспечением. При этом резко уменьшились размеры выноса азота урожаем зерна на фоне дозы N₂ в 3.9 раза и на фоне дозы N₃ – в 7.4 раза, что определялось существенным уменьшением урожая. Вынос азота урожаем соломы также снизился, но в меньшей степени: в 1.9 и в 1.1 раза соответственно. Вероятно, таким образом влияли нарушения процессов оттока ассимилятов из вегетативных органов в генеративные. Можно сделать вывод, что результатом воздействия дефицита влаги в почве в критический период роста растений было снижение размеров поступления азота в растения и процессов перераспределения азота между органами растения пшеницы, что было также показано в исследованиях с различными культурами [21, 22] и нами в предыдущих исследованиях [23].

Предпосевная обработка семян молибденом в условиях почвенной засухи способствовала возрастанию выноса азота урожаем надземной массы яровой пшеницы на фоне обеих доз азота в 1.5–1.6 раза. В то же время при применении мо-

Таблица 4. Содержание молибдена в растениях пшеницы в зависимости от условий выращивания, мкг/кг сухой массы

Вариант		Оптимальное водообеспечение		Краткосрочная почвенная засуха	
доза азота, мг/кг почвы	предпосевная обработка семян	зерно	солома	зерно	солома
Опыт в вегетационном домике					
150	Без обработки	335	217	496	756
	Mo	386	1450	1530	1990
300	Без обработки	612	1590	700	1480
	Mo	1360	3490	1840	2250
<i>HCP</i> ₀₅		50	85	110	140
Опыт в фитотронной установке					
150	Без обработки	396	1170	616	1920
	Mo	759	1750	822	2040
300	Без обработки	759	1700	896	1990
	Mo	1900	3500	1940	2450
<i>HCP</i> ₀₅		50	90	110	140

либдена изменился вынос общего азота урожаем зерна и соломы пшеницы. На фоне дозы N_2 в варианте с молибденом вынос азота урожаем зерна увеличился на 5%, в то же время как вынос азота урожаем соломы возрос в 1.9 раза. На фоне дозы N_3 в варианте с использованием молибдена увеличение выноса общего азота урожаем зерна произошло почти в 4 раза, урожаем соломы – в 1.7 раза. Резкое возрастание выноса азота урожаем зерна было обусловлено ростом урожая в этом варианте, а также, по-видимому, увеличением поступления азота в растения после прекращения засухи в репарационный период. Таким образом, можно сделать вывод, что применение молибдена при выращивании растений в условиях краткосрочной почвенной засухи способствовало активизации процессов поступления азота в растения, а также более эффективному перераспределению азота между органами и его накоплению преимущественно в агрономически ценной части урожая пшеницы. В предыдущих наших исследованиях показано [24], что применение молибдена путем предпосевной обработки семян стимулировало процесс развития корневой системы. Это способствовало улучшению поступления в растения азота в периоды до наступления засухи, сохранению жизнеспособности растений пшеницы во время воздействия дефицита влаги в почве, затем активизировало отток ассимилятов из вегетативной части в репродуктивные органы, что определило возрастание озерненности колоса и зерновой продуктивности. Наибольшая эффективность молибдена в условиях засухи проявилась при высоком обеспечении растений пшеницы азотным питанием.

Вопросы взаимного влияния азота и молибдена на их поступление в растения при оптимальном водообеспечении и в условиях дефицита влаги в почве являются актуальными и мало изученными. Поэтому в задачи наших исследований входила оценка накопления молибдена в зависимости от уровня азотного питания и условий водообеспечения (табл. 4). Показано, что с увеличением уровня азотного питания возрастало содержание молибдена в зерне в 1.8 раза в опыте в вегетационном домике и в 1.9 раза в опыте в фитотроне, также и в соломе в 7.3 и в 1.5 раза соответственно. В вариантах, где применяли предпосевную обработку молибденом, существенно возрастало его количество в зерне и соломе растений пшеницы. Отмечено, что содержание молибдена в зерне пшеницы в значительной степени зависело от уровня азотного питания. Например, при использовании предпосевной обработки семян молибденом на фоне дозы N_1 содержание этого элемента в зерне пшеницы возросло только на 15% по сравнению с вариантом без применения молибдена. На фоне дозы N_2 содержание молибдена возросло в 1.9 раза, на фоне дозы N_3 – в 2.2–2.5 раза по сравнению с вариантами без применения молибдена. Содержание молибдена в соломе пшеницы возрастало от 1.5 до 6.7 раза по сравнению с контрольными вариантами.

Установлено, что применение молибдена путем предпосевной обработки семян способствовало существенному возрастанию его содержания в зерне и соломе при высоком обеспечении растений азотным питанием. Это, вероятно, происходило в результате стимулирования поступления

микроэлемента из почвы. В данном случае проявлялись синергические процессы взаимодействия между молибденом и азотом, поскольку интенсивность процессов обмена азота в растениях тесно связана с присутствием молибдена, в доступном для них состоянии.

В условиях засухи во всех вариантах отмечено увеличение его содержания в зерне и соломе пшеницы по сравнению с вариантами при оптимальном водообеспечении. Применение молибдена для предпосевной обработки семян при дефиците влаги в почве стимулировало поступление микроэлемента в растения пшеницы сорта Иволга. Установлено возрастание содержания молибдена при всех уровнях азотного питания как в зерне, так и в соломе. Например, на фоне низкой дозы азота содержание молибдена увеличилось в зерне в 3 раза, в соломе — в 2.6 раза, на фоне средней дозы азота — в 1.3 и 1.06 раза, на фоне высокой дозы азота — в 2.2–2.6 и 1.2–1.5 раза соответственно.

Следует отметить, что наибольшие абсолютные размеры накопления молибдена наблюдали в соломе при всех уровнях азотного питания, однако максимальное относительное возрастание содержания элемента показано в зерне как при оптимальном водообеспечении, так и в условиях краткосрочного дефицита влаги в почве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, были изучены особенности влияния молибдена на урожай и формирование элементов продуктивности яровой пшеницы сорта Иволга в зависимости от уровня азотного питания и условий водообеспечения. Изучены закономерности взаимного влияния молибдена и азота при поступлении их в растения и накоплении в агрономически ценных частях растений в оптимальных условиях водообеспечения и при дефиците влаги в почве в критический период роста растений.

Выявлено, что в оптимальных условиях водообеспечения молибден оказывал существенное влияние на формирование репродуктивной сферы растений пшеницы, увеличивая число зачаточных цветков, заложившихся на конусе нарастания на VI этапе органогенеза, а также доли реализации цветков в зерно. Это определило большую озерненность колоса и привело к увеличению урожайности пшеницы с наиболее оптимальной структурой урожая.

Показано, что применение предпосевной обработки семян молибденом повышало устойчивость пшеницы к водному дефициту в критический период роста растений, снижая негативное действие дефицита влаги в почве на формирова-

ние элементов продуктивности и величину урожая растений. Важным условием получения максимального эффекта при применении молибдена было высокое обеспечение растений азотом. В этих условиях применение молибдена существенно удлиняло период развития конуса нарастания и улучшало условия формирования зачаточных цветков, что и определило получение более высокого урожая зерна в этих вариантах по сравнению с контролем.

Результаты исследования позволили установить существенное защитное действие молибдена, которое проявлялось в активизации поступления азота и молибдена в растения и способствовало активизации физиолого-биохимических процессов, также определило увеличение зерновой продуктивности пшеницы сорта Иволга при оптимальном водообеспечении и условиях засухи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Школьник М.Я.* Микроэлементы в жизни растений. Л.: Наука, 1974. 324 с.
2. *Жизневская Г.Я.* Медь, молибден и железо в азотном обмене бобовых растений. М.: Наука, 1972. 335 с.
3. *Ягодин Б.А.* Влияние микроэлементов (Mo, Co, Zn) на физиологические процессы и продуктивность овощных растений: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: МОПИ им. Н.К. Крупской, 1964. 26 с.
4. *Боженко В.П.* Микроэлементы и проблемы устойчивости растений к неблагоприятным условиям среды // Физиологическая роль и практическое применение микроэлементов. Рига: Зинатне, 1976. С. 110–123.
5. *Тома С.И.* Микроэлементы как фактор оптимизации питания растений // Микроэлементы в обмене веществ и продуктивности растений. Киев: Наукова думка. 1984. С. 5–7.
6. *Штефурц А.А., Чернат В.И., Салчева Г.С., Зафиров И.С.* Влияние молибдена на дыхание растений в условиях переменной влажности почвы // Изв. АН Респ. Молдова. Биол. и хим. науки. 1991. № 5. С. 6–12.
7. *Бредихин В.Н.* Влияние почвенной засухи и молибдена на содержание белковых фракций в листьях гороха // Актуальные вопросы современной ботаники. Киев, 1977. С. 18–21.
8. *Ислам Мб.З.* Влияние молибдена и цинка на засухоустойчивость и продуктивность яровой пшеницы: Автореф. дис. ... канд. с.-х. наук. М.: МСХА, 1998. 20 с.
9. *Катальмов М.В.* Микроэлементы и удобрения. М.: Мир, 1965. 330 с.
10. *Муравин Э.А.* Вопросы азотного питания растений и повышения эффективности азотных удобрений: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М.: ТСХА, 1991. 58 с.

11. *Кабата-Пендиас А., Пендиас Х.* Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир, 1989. 439 с.
12. *Казачков Ю.Н., Щелевой Г.К.* Агрохимические факторы эффективности использования молибденового удобрения под сорго // Приемы регулирования продуктивности сои. Новосибирск: СО ВАСХНИЛ, 1987. С. 139–154.
13. *Токовой Н.А., Майборода Н.М.* Микроэлементный состав растений в зависимости от почв и применения удобрений // Тр. АлтайСХИ. 1966. Вып. 9. С. 39–41.
14. *Goldenberg S., Forster H.* Factors affecting Mo adsorption by soils and minerals // Soil Sci. 1998. V. 163. № 2. P. 109–114.
15. *Кобзаренко В.И., Волобуева В.Ф., Серегина И.И., Ромодина Л.В.* Агрохимические методы исследований: Учебник. М.: Изд-во РГАУ–МСХА, 2015. 309 с.
16. *Коновалов Ю.Б., Хуцапария Т.И., Зайцева Н.В.* Технологические особенности селекционного процесса яровой пшеницы в МСХА // Докл. МСХА. 2001. Вып. 276. Ч. 2. С. 226–231.
17. *Кидин В.В., Дерюгин И.П., Кобзаренко В.И.* Практикум по агрохимии / Под ред. Кидина В.В. М.: КолосС, 2008. 599 с.
18. *Альтергот В.Ф., Мордкович С.С., Игнатъев Л.А.* Принципы оценки засухо- и жароустойчивости растений // Методы оценки устойчивости к неблагоприятным условиям среды. Л.: Колос, 1976. С. 16–17.
19. *Кумаков В.А.* Соотношение продуктивности и засухоустойчивости генотипов пшеницы // Тез. докл. IV съезда Всерос. общ-ва физиологов растений. М.: ИФР, 1999. С. 400.
20. *Кирнос С.В., Чернова Е.Н.* Влияние молибдена на азотный обмен яровой пшеницы при повышенном азотном питании // Физиологические основы действия удобрений на урожай зерна и его качество // Тр. ВИУА. М., 1990. С. 28–31.
21. *Григорюк И.А., Петренко Н.И., Шведова О.Е., Ярошенко Е.А.* Водный и азотный обмен зерновых культур в условиях разной водообеспеченности // Физиол. и биохим. культ. раст. 2000. Вып. 35. № 5. С. 401–409.
22. *Adjetej J.A., Searle P.G.E., Campbell L.C.* Rate and timing of nitrogen fertilizer applications on wheat grown under dry land and supplementary irrigation // S. Afric. J. Plant Soil. 2001. V. 18. № 1. P. 15–20.
23. *Серегина И.И., Ниловская Н.Т.* Роль селена в формировании продуктивности в условиях окислительного стресса. Монография. М.: ВНИИ им. Д.Н. Прянишникова, 2015. 152 с.
24. *Серегина И.И., Ниловская Н.Т.* Фотосинтетическая активность и донорно-акцепторные отношения растений яровой пшеницы при применении молибденовокислого аммония в условиях засухи // Агрохимия. 2020. № 7. С. 26–35.

Regulation of Yield of Spring Wheat (*Triticum aestivum* L.) when Growing in Conditions of Moisture Deficiency in the Soil by Using Molybdenum, Depending on the Level of Nitrogen Nutrition

I. I. Seregina^{a, #} and N. T. Nilovskaya^b

^a Russian State Agrarian University—Moscow Timiryazev Agricultural Academy
ul. Timiryazevskaya 49, Moscow 127550, Russia

^b D.N. Pryanishnikov Research Institute of Agricultural Chemistry
ul. Pryanishnikova 31, Moscow 127550, Russia

[#]E-mail: seregina.i@inbox.ru

In model experiments in soil culture, a method was studied for regulating the yield of spring wheat under conditions of optimal water supply and drought by using molybdenum with varying nitrogen nutrition. It was found that the use of pre-sowing treatment of seeds with molybdenum helped to improve the conditions for the formation of the reproductive sphere of plants, which determined an increase in wheat yield under conditions of optimal water supply. Under the conditions of a short-term soil drought, molybdenum stabilized the processes of grain formation, which led to an increase in the share of flowers in grains and an increase in the grain content of the colossus. It was found that the use of molybdenum for growing plants under conditions of short-term soil drought promoted the activation of the processes of nitrogen supply to plants, as well as more efficient redistribution of nitrogen between organs and accumulation mainly in the agronomically valuable part of the wheat crop. This contributed to the improvement of nitrogen supply to plants during periods before the onset of drought, the preservation of the viability of wheat plants during exposure to moisture deficiency in the soil, and then activated the outflow of assimilates from the vegetative part to the reproductive organs. This contributed to an increase in the resistance of wheat plants to water stress during the critical period of their growth and led to an increase in the yield of spring wheat.

Key word: treatment of seeds with molybdenum before sowing, spring wheat, drought during the critical period of plant growth.

УДК 631.41:632.122:631.445.35(470.62)

ВЛИЯНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗЕМЕЛЬ ПОД ОБЪЕКТЫ КУРОРТНО-РЕКРЕАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ НА СОСТОЯНИЕ И СВОЙСТВА ТИПИЧНЫХ ДЕРНОВО-КАРБОНАТНЫХ ПОЧВ Г. СОЧИ

© 2021 г. А. М. Гребенников

Федеральный исследовательский центр “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”
119017 Москва, пер. Пыжевский, 7, стр. 2, Россия

E-mail: gream1956@gmail.com

Поступила в редакцию 25.09.2020 г.

После доработки 23.11.2020 г.

Принята к публикации 11.01.2021 г.

На примере курортно-гостиничного комплекса “Лазурная” г. Сочи рассмотрено влияние землепользования под объекты курортно-рекреационного назначения на агрохимические свойства и загрязнение приоритетными токсикантами типичных дерново-карбонатных почв. Показано, что использование территории под объекты курортно-рекреационного назначения не приводило к существенному ухудшению свойств почв, а в некоторых случаях (при добавлении искусственного грунта на торфяной основе и внесении минеральных удобрений) являлось фактором их улучшения. Состояние почв склоновых участков на землях курортно-гостиничного комплекса было значительно лучше по сравнению с почвами склонов, менее интенсивно используемых в хозяйственной деятельности. Использование территории под гостиничный комплекс не явилось фактором загрязнения почв тяжелыми металлами и мышьяком. Превышение нормативов содержания мышьяка в исследованных почвах могло быть связано как с его высоким содержанием в почвообразующих породах, так и с антропогенной деятельностью, среди которой наиболее значимым было применение на сельскохозяйственных и декоративных культурах пестицидов на основе мышьяка в середине прошлого столетия.

Ключевые слова: рациональное использование почв, земли курортно-гостиничного комплекса, агрохимические свойства, водная эрозия, загрязнение тяжелыми металлами и мышьяком.

DOI: 10.31857/S0002188121040062

ВВЕДЕНИЕ

Природные комплексы Черноморского побережья Кавказа, образованные на стыке субтропиков и высокогорий, имеющие большую средозащитную, научную, лечебно-оздоровительную и рекреационную ценность, входят в состав Сочинского национального парка, занимающего территорию Большого Сочи и имеющего статус особо охраняемой территории федерального значения (Постановление Совета Министров РСФСР от 05.05.1983 № 214). Однако не только природные комплексы Сочинского национального парка имеют большое значение для отдыха и оздоровления населения. Не менее важным является состояние природных компонентов непосредственно на территории санаториев и гостиниц. При этом часто во внимание принимают только состояние воздуха и растительности, а оценку состояния почв проводят достаточно редко. Тем не менее, отмечено, что антропогенное вмешательство ока-

зывает негативное влияние на почвенный покров и приводит к нарушению природных ландшафтов, активизации эрозии, обвалов, оползней и других опасных процессов, а также к загрязнению почв [1]. Подчеркивая важность почв как объекта природы, В.И. Вернадский называл их центральным звеном биосферы, от которого существенно зависит состояние всех остальных компонентов окружающей среды [2].

Черноморское побережье Краснодарского края располагается в зоне влажных субтропиков, с характерным для этой зоны температурным и влажностным режимом. Эти условия определили развитие на территории г. Сочи основных зональных типов почв: желтоземов и буроземов [3]. В местах локальных выходов карбонатов (мергеля), представленных элювием и элювиально-делювиальными наносами, сформировались дерново-карбонатные почвы, являющиеся для субтропической зоны азональным типом [4]. Эти почвы

встречаются достаточно редко в пределах г. Сочи. Их доля на Северном Кавказе составляет 4.3% от площади этого региона [5]. Почвенный покров претерпел существенные антропогенные, в том числе и агрогенные, изменения. Агрогенное воздействие тесно связано с технологией выращивания сельскохозяйственных и декоративных субтропических культур, что приводит к одностороннему воздействию на почвы и наряду с другими антропогенными нагрузками, например, рекреационными, может быть фактором развития деградационных процессов в почвах побережья: дегумификации, ухудшения агрофизических и агрохимических свойств, уменьшения мощности почвенного профиля, развития ускоренной эрозии [6].

Почвы Черноморского побережья изучали практически с начала прошлого века [7]. Однако и в настоящее время некоторые проблемы генезиса и трансформации этих почв под влиянием различных антропогенных факторов изучены недостаточно и нуждаются в проведении дальнейших исследований [5–7].

В процессе возведения и последующей эксплуатации объектов лечебно-оздоровительного и рекреационного назначения неизбежно проявление негативного воздействия на почву. На этапе строительства это в основном связано с проведением земляных работ (рытьем канав и котлованов, проведением инженерной планировки и т.п.), загрязнением почв веществами, содержащимися в выбросах строительной техники, нефтепродуктами, строительными отходами. В результате такого воздействия может произойти ухудшение всего комплекса свойств почв. Гумусовый горизонт может быть частично или полностью уничтожен, а также перемешан с материалом нижележащих неплодородных горизонтов. Осаждение на почву выбросов строительной техники, попадание нефтепродуктов и строительного мусора приводит к ее загрязнению токсичными веществами. Воздействие ходовой части строительной техники на почву приводит к ее переуплотнению и связанному с ним ухудшению комплекса водно-физических свойств. Проведение мероприятий по рекультивации почв после окончания этапа строительства частично восстанавливает почвенные свойства. Однако и на этапе эксплуатации почвенный покров также испытывает негативные воздействия, что обусловлено главным образом рекреационной нагрузкой на почву и ее возможным загрязнением выбросами автотранспорта, пребывающего на территорию объектов лечебно-оздоровительного и рекреационного назначения.

При этом, если загрязнение выбросами автотранспорта можно регулировать ограничением количества автомашин, прибывающих на территорию объектов, то рекреационную нагрузку на эту территорию контролировать значительно сложнее. Следует заметить, что избыточная рекреационная нагрузка, приводящая к уплотнению и разрушению структуры почв, оказывает негативное влияние практически на весь комплекс водно-физических свойств почвы, в том числе и на водопроницаемость, величина которой значительно снижается [8]. Это в свою очередь является фактором увеличения поверхностного стока и активизации процессов водной эрозии [9], а также причиной снижения продуктивности растительного компонента вследствие уменьшения поступления влаги в почву [10].

Цель работы – установление влияния на состояние дерново-карбонатных типичных почв (*Leptosols Rendzic* в соответствии с WRB) использования земель под объекты курортно-рекреационного назначения на примере территории гостиницы “Лазурная”.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в 2010 г. на территории, отведенной в конце 1970–начале 1980 гг. под размещение курортно-гостиничного комплекса “Лазурная”. Однако строительство затянулось, и гостиница “Рэдисон САС Лазурная” приняла своих первых постояльцев только 1 мая 1994 г. [11]. Известно, что до этого наиболее значимым воздействием на природную среду было строительство у северной границы этого участка автомагистрали Сочи–Мацеста, позже переименованной в Курортный проспект [12]. Основная часть отведенной территории была занята парком и газонами. Почвенный покров территории гостиницы “Лазурная” был представлен дерново-карбонатными типичными почвами, в разной степени подверженными антропогенному воздействию.

Исследованная территория расположена на склоне общей крутизной 15–20°, простирающемся от Курортного проспекта к морю. На этой территории выровненные, практически горизонтальные участки перемежаются со склонами, крутизна которых может достигать 35–40°.

На выровненных участках и на склонах разной крутизны территории курортно-гостиничного комплекса, а также на фоновом участке были заложены разрезы и прикопки. Проводили описание строения почвенной толщи. Поскольку на территории гостиницы почвы часто были нару-

шены и характеризовались отсутствием верхних горизонтов, образцы отбирали по фиксированному от поверхности глубинам: 0–5, 5–10, 15–20, 35–40 см.

Фоновый участок был выбран с учетом распространения таких же почв, что и на территории гостиницы, отсутствия видимых признаков антропогенных нарушений, расположения за пределами территорий гостиниц и покрытия естественной растительностью. При выборе фонового участка были полностью соблюдены требования пункта 4.21 [13].

В отобранных образцах определяли агрохимические свойства почв (содержание гумуса по Тюрину, подвижного фосфора и обменного калия по Мачигину, pH_{H_2O}) по методикам, изложенным в [14]. Были взяты образцы для определения содержания тяжелых металлов (Mn, V, Ni, Cu, Zn, Pb) и мышьяка [15, 16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Морфологическое строение дерново-карбонатных почв без видимых нарушений профиля изучали на фоновом участке в месте с координатами N43.552741 и E39.774641, где была сформирована дерново-карбонатная типичная почва, профиль которой характеризовался следующим строением:

A0 (0–4 см) – подстилка из разложившегося листового и древесного опада;

A1 (4–21 см) – темно-серый, комковато-зернистый, рыхлый, к низу уплотнен, свежий, легкоглинистый. Иногда встречаются включения карбонатного гравия и щебня. Вскипает с поверхности от 10%-ной соляной кислоты. Переход к нижележащему горизонту заметный по цвету, структуре, плотности, количеству гравия и щебня, граница неровная;

B (21–31 см) – коричневатобурый, ореховатоглыбистый, плотный, свежий, легкоглинистый. По сравнению с горизонтом A содержит значительно больше гравия и щебня. Встречаются небольшие камни. Переход ясный по цвету, структуре, количеству гравия, щебня и мелких камней, граница волнистая;

C (31–50 см и ниже) – светло-бурый, бесструктурный, плотный, свежий, легкоглинистый. По сравнению с горизонтом B содержит значительно больше скелетных частиц карбонатных пород.

По морфологическому строению почвы, расположенные на территории гостиницы, значительно отличались от ненарушенных почв фоно-

вого участка. В почвах гостиницы фрагменты гумусовых горизонтов сохранились лишь на пологих участках, имеющих уклон $<1-2^\circ$. Иногда на таких участках (в местах устройства клумб на устроенных террасах) к материалу естественных гумусовых горизонтов был добавлен искусственный грунт на торфяной основе.

На остальной части территории доминировали склоны крутизной от 20 до 40°. Горизонты A и B на склонах практически полностью отсутствовали. Непосредственно за плотной дерниной мощностью 1–2 см следовал карбонатный элювий, аналогичный материалу горизонта C на фоновом участке.

Средние показатели агрохимических свойств почв в образцах, отобранных из заложенных разрезов и прикопок и сгруппированных по указанным элементам рельефа, в пределах территории, отведенной под гостиницу “Лазурная”, и на фоновом участке представлены в табл. 1. Показано, что агрохимические свойства дерново-карбонатных типичных почв, в зависимости от их приуроченности к преобладающим элементам рельефа на территории гостиницы “Лазурная”, различались как между собой, так и по отношению к фоновому участку. Наиболее высоким содержанием органического вещества отличались пологие участки, на поверхность которых для устройства клумб, грядок и теплиц был добавлен торфяной грунт. Содержание органического вещества в слое 0–10 см значительно превышало содержание гумуса в этом слое как на пологих участках с остатками естественных верхних горизонтов почвы, так и на фоновом участке с ненарушенными дерново-карбонатными типичными почвами. Содержание гумуса в слое 0–10 см на пологих участках с остатками естественных верхних горизонтов почвы было значительно меньше (в 1.1–1.6 раза) по сравнению с фоновым участком. Как и следовало ожидать, исходя из строения почвенной толщи, содержание гумуса на склонах было гораздо меньше, чем на пологих участках. При этом чем круче был склон, тем меньше гумуса сохранила расположенная на нем почва. На глубинах 0–5 и 5–10 см склона крутизной 25–30° по сравнению с фоновым участком содержалось гумуса соответственно в 2.8 и 3.3 раза меньше; для склона 40–45° эти величины были меньше в 3.1 и 4.7 раза. Ниже с глубиной различия между всеми сравниваемыми почвами по содержанию органического вещества уменьшались и на глубине 35–40 см были несущественными.

Ближние тенденции к различиям между сравниваемыми почвами отмечали и для содержания подвижного фосфора и обменного калия. Наиболее

Таблица 1. Средние показатели агрохимических свойств исследованных почв наиболее распространенных элементов рельефа на территории, отведенной под гостиницу “Лазурная”, и фонового участка

Место отбора образцов почв	Глубина взятия, см	Содержание			pH _{H₂O}
		гумуса, %	фосфора	калия	
			мг/кг почвы		
Пологие участки с нанесенным на поверхность торфяным грунтом	0–5	8.97 ± 0.6	480 ± 40	772 ± 64	8.04 ± 0.04
	5–10	7.96 ± 1.5	320 ± 23	380 ± 36	8.12 ± 0.05
	10–15	2.88 ± 1.1	285 ± 10	290 ± 30	8.22 ± 0.06
	35–40	0.51 ± 0.7	65 ± 3	228 ± 3	8.60 ± 0.02
Пологие участки с остатками естественных верхних горизонтов почвы	0–5	3.68 ± 0.2	41.5 ± 1.4	301 ± 2	8.36 ± 0.02
	5–10	4.04 ± 0.4	33.6 ± 0.4	199 ± 4	8.38 ± 0.01
	10–15	2.01 ± 0.1	11.2 ± 0.8	182 ± 1	8.46 ± 0.01
	35–40	0.62 ± 0.11	5.2 ± 0.3	168 ± 2	8.82 ± 0.03
Склон крутизной 25–30°	0–5	2.06 ± 0.3	20.7 ± 0.7	280 ± 6	8.42 ± 0.03
	5–10	1.39 ± 0.2	14.1 ± 0.5	196 ± 6	8.49 ± 0.02
	10–15	0.93 ± 0.1	11.3 ± 0.5	136 ± 6	8.55 ± 0.02
	35–40	0.68 ± 0.1	12.8 ± 0.9	136 ± 4	8.52 ± 0.03
Склон крутизной 40–45°	0–5	1.83 ± 0.2	13.6 ± 0.9	147 ± 5	8.51 ± 0.03
	5–10	0.98 ± 0.1	6.9 ± 1.2	122 ± 1	8.58 ± 0.02
	10–15	0.97 ± 0.1	5.5 ± 0.6	124 ± 1	8.59 ± 0.03
	35–40	0.94 ± 0.1	5.3 ± 0.5	128 ± 3	8.54 ± 0.02
Фоновый участок	0–5	5.72 ± 0.9	45.9 ± 2.1	350 ± 4	8.32 ± 0.01
	5–10	4.58 ± 1.1	48.7 ± 3.2	320 ± 3	8.34 ± 0.02
	10–15	2.73 ± 0.2	32.4 ± 2.2	312 ± 3	8.57 ± 0.01
	35–40	0.89 ± 0.1	22.2 ± 1.3	285 ± 2	8.72 ± 0.02

высоким содержанием этих элементов характеризовались почвы пологих участков, на поверхность которых был нанесен торфяной грунт. Далее, в порядке уменьшения содержания подвижного фосфора и обменного калия следовал фоновый участок, затем пологие участки с остатками естественных верхних горизонтов почвы, потом склоны крутизной 25–30° и склоны крутизной 40–45°.

На пологих участках с нанесенным на поверхность торфяным грунтом для всех исследованных глубин содержание подвижного фосфора соответствовало градации “очень высокое” [10]. На фоновом участке в слое 0–10 см содержание подвижного фосфора было высоким, на глубине 10–15 см – повышенным, на глубине 35–40 см – средним. Слой 0–10 см на пологих участках с остатками естественных верхних горизонтов почвы содержал повышенное количество подвижного фосфора, на глубине 10–15 см содержание этого элемента было низким, а на глубине 35–40 см

соответствовало градации “очень низкое”. На склоне крутизной 25–30° в пределах слоя 0–5 см количество подвижного фосфора было средним, на остальных глубинах – низким. На глубине 0–5 см склона крутизной 40–45° содержание подвижного фосфора было низким, на остальных глубинах – очень низким.

Содержание обменного калия на пологих участках с нанесенным на поверхность торфяным грунтом в пределах слоя 0–5 см следовало считать очень высоким, на глубине 5–10 см – повышенным, на остальных глубинах – средним [17]. Фоновый участок характеризовался слоем 0–15 см с повышенным содержанием калия и средним его количеством на глубине 35–40 см. Пологие участки с остатками естественных верхних горизонтов почвы в слое 0–5 см обладали повышенным, а на остальных глубинах – средним содержанием обменного калия. На склоне крутизной 25–30° в пределах слоя 0–5 см содержание обменного ка-

лия было средним, на остальных глубинах и по всему профилю на склоне крутизной 40–45° содержание этого элемента было низким.

Величина pH_{H_2O} вне зависимости от расположения участка увеличивалась вниз по профилю. В гумусовых горизонтах реакция среды была среднещелочной, в материнской породе – сильнощелочной.

Таким образом, использование дерново-карбонатных типичных почв на территории гостиницы “Лазурная” приводило к неоднозначным результатам по сравнению с почвами ненарушенного сложения фонового участка. Пологие участки с остатками естественных верхних горизонтов почвы по сравнению с почвами ненарушенного сложения фонового участка характеризовались менее благоприятными агрохимическими свойствами и более низким уровнем плодородия. С другой стороны, почвы пологих участков с нанесенным на поверхность торфяным грунтом превосходили по этим показателям почвы фонового участка. По плодородию и агрохимическим свойствам почвы склонов значительно уступали фоновому участку. Однако при этом следует отметить, что было бы неправильно сравнивать почвы фонового участка, расположенного практически на горизонтальной поверхности с почвами крутых склонов. На склонах такой крутизны в условиях, более приближенных к естественным, по сравнению с использованием территории под гостиницу часто происходят гораздо более выраженные эрозионные процессы, которые приводят к сносу всего мелкозема или даже к смыву скелетной части вплоть до плотных пород. Вероятно, культивирование густой дернины на крутых склонах в условиях территории, отведенной под гостиницу, лучше предотвращало развитие эрозии и смыв мелкозема в сравнении с естественными условиями.

В этих же образцах, в которых определяли агрохимические свойства, проводили анализы на содержание тяжелых металлов и мышьяка (табл. 2). Установлено, что содержание токсикантов, за исключением мышьяка, не превышало соответствующих экологических норм во всех исследованных образцах. Содержание мышьяка в основном было на уровне следов, однако в 5-ти случаях из 20 количество мышьяка было очень высоким, превышающем норматив в 5 и более раз. Такое распределение содержания мышьяка в исследованных пробах было, вероятно, обусловлено каким-то локальным фактором, не связанным с поступлением этого вещества на поверхность или влиянием на территорию размещения гостиницы, поскольку при осадении мышьяка на по-

верхность почвы его содержание было бы более равномерно распределено по исследованной территории и в основном приурочено к верхним глубинам опробования. Этому противоречило возникновение локально высоких концентраций мышьяка в отдельных местах на фоне его следов на соседних глубинах. Причем только в одном из пяти случаев высокая концентрация мышьяка была характерна для верхнего слоя. О том, что использование исследованной территории под гостиницу не приводило к загрязнению почв мышьяком свидетельствовал факт распространения мест загрязненных этим токсикантом как на территории, отведенной под гостиницу, так и на фоновом участке, на который размещение гостиницы не влияло. Более того, если на территории гостиницы места с высокими концентрациями мышьяка встречались в 3-х из 16-ти или в 19% случаев, то на фоновом участке встречаемость таких мест была гораздо выше и составляла 50% случаев (2 из 4). Следует отметить, что высокая концентрация мышьяка в почвах Черноморского побережья была отмечена и другими исследователями. Например, по данным [18], среднее содержание мышьяка в почвах под г. Адлером составило 40 мг/кг. В работе [19], так же как в настоящей статье, были получены аналогичные результаты, из которых следовало, что содержание тяжелых металлов в почве не превышало санитарно-гигиенических нормативов, тогда как содержание мышьяка практически во всех случаях было очень высоким. Такое содержание мышьяка в почвах Черноморского побережья могло быть результатом исходного высокого содержания мышьяка в элюво-делювии плотных пород [20], а также следствием антропогенных воздействий на почву, среди которых наиболее значимым могло быть применение на сельскохозяйственных и декоративных культурах в 1950–1970 гг. прошлого столетия высокотоксичных, стойких в окружающей среде пестицидов на основе мышьяка [21].

Для оценки влияния загрязнения почв на здоровье людей рассчитывали суммарный показатель загрязнения (Z_c) по следующей формуле [22]:

$$Z_c = \text{сумма } (Kci + \dots + Kcn) - (n - 1), \text{ где}$$

n – число определяемых суммируемых вещества,

Kci – коэффициент концентрации i -го компонента загрязнения, равный отношению фактического содержания определяемого вещества в почве (Ci) в мг/кг почвы к фоновому уровню (Cfi).

Расчет проводили с учетом всех токсикантов за исключением мышьяка, т.к. практическое отсутствие этого элемента во многих образцах, отобранных с территории гостиницы и фонового

Таблица 2. Средние показатели содержания тяжелых металлов и мышьяка в исследованных почвах наиболее распространенных элементов рельефа на территории, отведенной под гостиницу “Лазурная”, и фонового участка

Место отбора образцов почв	Глубина взятия, см	Содержание токсикантов, мг/кг почвы						
		Mn	V	Ni	Cu	Zn	Pb	As
Пологие участки с нанесенным на поверхность торфяным грунтом	0–5	1020 ± 200	142 ± 4	48 ± 6	63 ± 2	150 ± 5	46 ± 3	–
	5–10	1310 ± 110	138 ± 5	49 ± 3	74 ± 3	152 ± 3	49 ± 4	–
	10–15	1500 ± 120	144 ± 4	42 ± 4	80 ± 4	144 ± 4	40 ± 2	–
	35–40	600 ± 88	145 ± 2	40 ± 3	60 ± 1	111 ± 2	32 ± 2	–
Пологие участки с остатками естественных верхних горизонтов почвы	0–5	955 ± 100	135 ± 6	45 ± 7	66 ± 5	153 ± 3	38 ± 7	–
	5–10	902 ± 55	144 ± 3	46 ± 8	68 ± 6	202 ± 4	44 ± 5	–
	10–15	820 ± 23	142 ± 3	42 ± 3	78 ± 4	150 ± 3	36 ± 4	–
	35–40	796 ± 12	139 ± 2	43 ± 1	77 ± 2	148 ± 2	32 ± 3	–
Склон крутизной 25–30°	0–5	1150 ± 160	138 ± 10	49 ± 5	69 ± 8	161 ± 8	47 ± 7	–
	5–10	954 ± 80	112 ± 6	48 ± 6	67 ± 9	211 ± 5	39 ± 5	51 ± 5
	10–15	852 ± 41	132 ± 8	45 ± 4	62 ± 4	205 ± 4	36 ± 4	–
	35–40	612 ± 11	141 ± 3	52 ± 1	58 ± 2	212 ± 3	32 ± 3	–
Склон крутизной 40–45°	0–5	633 ± 14	139 ± 9	51 ± 7	55 ± 6	162 ± 9	53 ± 6	52 ± 6
	5–10	772 ± 15	137 ± 7	49 ± 5	52 ± 7	151 ± 5	48 ± 6	–
	10–15	809 ± 12	141 ± 5	43 ± 4	58 ± 4	122 ± 4	39 ± 5	–
	35–40	823 ± 9	143 ± 2	38 ± 2	63 ± 3	165 ± 4	32 ± 3	50 ± 3
Фоновый участок	0–5	662 ± 15	88 ± 7	25 ± 6	56 ± 8	174 ± 8	51 ± 6	–
	5–10	808 ± 17	85 ± 8	29 ± 7	49 ± 7	169 ± 7	45 ± 5	55 ± 4
	10–15	881 ± 12	81 ± 5	35 ± 5	43 ± 5	171 ± 7	38 ± 4	52 ± 3
	35–40	1050 ± 11	77 ± 3	42 ± 4	32 ± 2	154 ± 5	39 ± 3	–
ПДК (ОДК)*		1500	150	80	132	220	130	10

*В соответствии с ГН 2.1.7.2041-06 и ГН 2.1.7.2511-09.

участка, в большинстве случаев не давало возможности определить коэффициент концентрации этого компонента (табл. 3). Величина суммарного показателя загрязнения во всех образцах, отобранных на территории, отведенной под гостиницу “Лазурная”, изменялась от 7.2 до 8.6. Поскольку величина этого показателя не превысила 16, то суммарный уровень загрязнения исследованных почв тяжелыми металлами соответствовал “допустимой” градации – самой благополучной для здоровья людей. Такая же градация загрязнения по суммарному показателю была установлена для почв г. Сочи и другими исследователями [23].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, использование территории под объекты курортно-рекреационного назначения при соблюдении норм охраны природы не приводило к существенному ухудшению свойств почв, а в некоторых случаях было фактором их улучшения. Определенное ухудшение агрохими-

ческих свойств (снижение содержания гумуса, подвижного фосфора и обменного калия) по сравнению с фоновым участком отмечено в местах устройства клумб и газонов на пологих участках с остатками естественных верхних горизонтов почвы. Тем не менее, на таких же пологих участках при добавлении к материалу естественных гумусовых горизонтов искусственного грунта на торфяной основе и внесении минеральных удобрений агрохимические свойства почв соответствовали значительно более высокому уровню плодородия по сравнению с почвами фонового участка. Отсюда следует, чтобы почвы, расположенные на территории, отведенные под объекты курортно-рекреационного назначения, не деградировали в плане агрохимических свойств и могли бы в полной мере обеспечивать условия для нормальной жизнедеятельности растений, а также для поддержания других компонентов природы, необходимо периодически на таких участках проводить почвенный мониторинг, по результатам которого принимать к исполнению меры по поддержанию уровня плодородия почв.

Таблица 3. Суммарный показатель загрязнения (Z_c) тяжелыми металлами исследованных почв наиболее распространенных элементов рельефа на территории, отведенной под гостиницу “Лазурная”

Место отбора образцов почв	Глубина взятия, см	Z_c
Пологие участки с нанесенным на поверхность торфяным грунтом	0–5	8.2
	5–10	8.6
	10–15	8.6
	35–40	8.0
Пологие участки с остатками естественных верхних горизонтов почвы	0–5	7.8
	5–10	8.2
	10–15	7.7
	35–40	8.0
Склон крутизной 25–30°	0–5	8.5
	5–10	7.8
	10–15	7.7
	35–40	7.9
Склон крутизной 40–45°	0–5	7.7
	5–10	7.5
	10–15	7.2
	35–40	7.6

Состояние почв склоновых участков исследованной территории было значительно лучше по сравнению с почвами склонов, менее интенсивно используемых в хозяйственной деятельности. Этому способствовало культивирование густой дернины и устройство габионов, предотвращающих развитие эрозионных процессов, сопровождаемых вымыванием мелкозема и даже смывом скелетной части вплоть до плотных пород, что приводило к полному уничтожению почв и часто встречалось на участках, практически не используемых людьми.

Показано, что использование территории под гостиницу не было фактором загрязнения почв тяжелыми металлами и мышьяком. На протяжении длительного размещения на этой территории объектов курортно-рекреационного назначения содержание указанных токсикантов в почвах не превысило допустимых норм, а значение суммарного показателя загрязнения соответствовало градации, наиболее благоприятной для здоровья людей.

Превышение нормативов содержания мышьяка в почве могло быть связано как с его высоким содержанием в почвообразующих породах, так и с антропогенной деятельностью, среди которой наиболее значимой могло быть применение пестицидов на основе мышьяка на сельскохозяй-

ственных и декоративных культурах в середине прошлого столетия. Полученные результаты нашли соответствующее подтверждение в работах других авторов.

Таким образом, использование территории под объекты курортно-рекреационного назначения при соблюдении соответствующих природоохранных норм вполне соответствует целям охраны почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хованский А.Д., Орлинский А.С., Шустов Н.А. Комплексная оценка экологической ситуации в городе-курорте Большой Сочи // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. 2008. № 3. С. 88–92.
2. Вернадский В.И. Труды по биогеохимии и геохимии почв. М.: Наука, 1992. 434 с.
3. Малокова Л.С., Козлова Н.В. Зональные типы почв влажных субтропиков Черноморского побережья России // Субтроп. и декорат. садоводство. 2016. № 56. С. 146–156.
4. Герасимова М.И., Колесникова Н.В., Гуров И.А. Литолого-геоморфологические факторы формирования желтоземов и других почв во влажных субтропиках РФ. Сочинский дендрарий // Вестн МГУ. Сер. 5. География. 2010. № 3. С. 61–65.
5. Кутровский М.А. Эколого-генетические особенности и антропогенная трансформация рендзин Черноморского побережья Кавказа: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Ростов н/Д., 2006. 23 с.
6. Беседина Т.Д. Агрогенная трансформация почв Черноморского побережья Северо-Западного Кавказа при использовании под субтропические культуры: Автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук. Краснодар, 2004. 41 с.
7. Захарихина Л.В., Буртовой А.В. Антропогенная эволюция желтоземов санаторной зоны г. Сочи // Почвоведение. 2020. № 6. С. 751–761.
8. Ивонин В.М., Авдонин В.Е., Пеньковский Н.Д. Рекреационная экология горных лесов российского Причерноморья. М.: Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. 271 с.
9. Коваль И.П., Битюков Н.А. Экологические функции горных лесов Северного Кавказа. М.: ВНИИЦлесресурс, 2000. 480 с.
10. Щербина В.Г. Экологические аспекты буковых экосистем. 2-е изд-е. Кривой Рог: Изд-во I.V.I., 2004. 231 с.
11. <http://arch-sochi.ru/>
12. <https://www.sochiweb.ru/history/>
13. Инженерно-экологические изыскания для строительства. СП 11-102-97. М.: Госстрой РФ, 1997.
14. Практикум по агрохимии / Под ред. Минеева В.Г. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
15. РД 52.18.191-89. Методика выполнения измерений массовой доли кислоторастворимых форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом. М., 1990. 31 с.

16. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. М.: ЦИНАО, 1992. 61 с.
17. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: Росинформагротех, 2003. 240 с.
18. *Алексеев А.В., Алексеев В.А.* Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв се-литных ландшафтов. Ростов н/Д., 2013. 388 с.
19. Отчет (основные результаты) о проведении работ по обследованию уровней загрязнения окружающей среды (воздух, вода, донные отложения, почва) в зоне строительства олимпийских объектов в г. Сочи 14–21 мая 2010 г. Обнинск, 2010. 5 с.
20. *Антикаев Р.С.* Соединения мышьяка в почвах природных и антропогенных ландшафтов: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2005. 24 с.
21. *Янушевская Э.Б., Карпун Н.Н.* Основные этапы развития экотоксикологических исследований в садовых агроценозах Черноморского побережья России // Субтроп. и декорат. садоводство. Сочи, 2012. Вып. 47. С. 194–200.
22. Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. Метод. указ. МУ 2.1.7.730-99. М.: Минздрав РФ, 1999. 25 с.
23. Загрязнение почв Российской Федерации токсикантами промышленного происхождения в 2012 году. Обнинск, 2013. 138 с.

Influence of Land Use for Resort and Recreational Facilities on the State and Properties of Typical Sod-Carbonate Soils in Sochi

A. M. Grebennikov

*Federal Research Center "V. V. Dokuchaev Soil Institute"
per. Pyzhevsky 7, bld. 2, Moscow 119017, Russia
E-mail: gream1956@gmail.com*

On the example of the resort and hotel complex "Lazurnaya" in Sochi, the influence of land use for resort and recreational facilities on agrochemical properties and contamination with priority toxicants of typical sod-carbonate soils is considered. It is shown that the use of the territory for objects of resort and recreational purposes did not lead to a significant deterioration of soil properties, and in some cases (when adding artificial peat-based soil and applying mineral fertilizers) was a factor in their improvement. Soil slope land resort and hotel complex was much better in comparison to the soils of the slopes, less intensively used in economic activities. The use of the territory for a hotel complex was not a factor in soil contamination with heavy metals and arsenic. The excess of arsenic content standards in the studied soils could be related both to its high content in soil-forming rocks and to anthropogenic activities, among which the most significant was the use of arsenic-based pesticides on agricultural and ornamental crops in the middle of the last century.

Key words: rational use of soils, land of the resort and hotel complex, agrochemical properties, water erosion, pollution with heavy metals and arsenic.

УДК 622.882:633.31/.37:574.24

ЭФФЕКТИВНОСТЬ АССОЦИАЦИЙ РАСТЕНИЙ СЕМЕЙСТВА БОБОВЫХ И РОСТСТИМУЛИРУЮЩИХ БАКТЕРИЙ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ ПОЧВ¹

© 2021 г. Е. В. Кузина¹, Г. Ф. Рафикова^{1,*}, Е. А. Столярова¹, О. Н. Логинов¹

¹ Уфимский Институт биологии – обособленное структурное подразделение
Уфимского федерального исследовательского центра РАН
450054 Уфа, просп. Октября, 69, лит. Е, Россия

*E-mail: lab.biotech@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.07.2020 г.

После доработки 02.09.2020 г.

Принята к публикации 11.01.2021 г.

В условиях вегетационного опыта проведена оценка устойчивости нута бараньего *Cicer arietinum* L. и люцерны изменчивой *Medicago varia* Mart. к присутствию в почве углеводов нефти в концентрации 5% по массе. Приведены данные, характеризующие влияние поллютанта на морфометрические и морфологические показатели растений. Установлено положительное воздействие предпосевной обработки семян этих видов растений ростстимулирующими бактериями *Paenibacillus peori-ae* АНТ 13 и *Pseudomonas laurentiana* АНТ 17 на выживаемость, рост и развитие растений в условиях нефтяного загрязнения. Показано, что степень биодеструкции нефти с использованием нута составила 45, люцерны – 29%, при этом биоаугментация способствовала снижению содержания углеводов в почве дополнительно на 6–14%.

Ключевые слова: фиторемедиация, фитотоксичность, ростстимулирующие бактерии, нефть, *Cicer arietinum* L., *Medicago varia* Mart.

DOI: 10.31857/S0002188121040074

ВВЕДЕНИЕ

Биоремедиация представляет собой эффективный вариант восстановления загрязненной нефтью окружающей среды путем использования деградационных возможностей растений и микроорганизмов. Одним из направлений исследований биоремедиации является поиск видов растений, которые демонстрируют высокую устойчивость к углеводородному загрязнению почвы и, следовательно, могут выступать перспективными агентами фиторемедиации. Большая часть опубликованных работ посвящена изучению возможности применения для очистки земель, загрязненных углеводородами, видов Роасеае. Культуры семейства Fabaceae упоминаются гораздо реже в качестве растений-фиторемедиаторов [1, 2]. По сравнению с представителями злаковых трав растения семейства мотыльковых отличаются невысокими темпами деградации

нефтяных загрязнений [3]. Бобовые культуры обеспечивают не только рекультивацию загрязненной почвы, но и за счет симбиотических отношений с аборигенными микроорганизмами-азотфиксаторами способствуют восстановлению баланса азота и углерода, нарушаемого при попадании в почву углеводов.

При изучении влияния, которое нефть оказывает на представителей семейства бобовых, установлено, что растения могут переносить ее присутствие в почве в концентрации 3–8% [2, 4]. С целью повышения фиторемедиационного потенциала бобовых культур предлагается использовать агробактериальную трансформацию [5].

В нашей стране при рекультивации земель, загрязненных нефтепродуктами, из бобовых культур наиболее широко используют разных представителей родов люцерна и клевер. Это могут быть как чистые культуры, так и бобово-злаковые травосмеси [6]. Изучение индикативных характеристик растений показало, что, с одной стороны, низкие концентрации нефти могут стимулиро-

¹ Работа поддержана РФФИ, грант № 18-29-05025 и государственным заданием Минобрнауки России № 075-00326-19-00 по теме № АААА-А18-118022190100-9 с использованием оборудования ЦКП УФИЦ РАН “Агидель” (Уфа, Россия).

вать их рост. С другой стороны, нефтезагрязнители оказывают токсическое воздействие на развитие растений, следствием чего становится преждевременное пожелтение листьев, мелколистность, усыхание побегов [7].

Нами ранее были проведены исследования оценки устойчивости растений гороха посевного *Pisum sativum* L. и клевера лугового *Trifolium pratense* L. к присутствию в почве углеводородов нефти [8]. Было показано, что загрязнение нефтью в концентрации 4–8% снижало прорастание семян клевера более чем в 2 раза. На всхожесть растений гороха наличие в почве нефти в таком количестве отрицательного влияния не оказывало, но приводило к уменьшению длины побегов, массы и длины корней растений.

Очевидно, что морфологические изменения, происходящие с растениями под влиянием нефтяного загрязнения, обусловлены в первую очередь затруднениями с поступлением влаги к корням. В этой связи, на наш взгляд, особый интерес представляют засухоустойчивые бобовые культуры, способные переносить недостаток влаги в почве длительное время и сохранять жизнеспособность при обезвоживании. Одной из самых засухоустойчивых зернобобовых культур, возделываемых на территории Российской Федерации, является нут бараний *Cicer arietinum* L. [9, 10]. Среди других ксерофитов семейства мотыльковых следует упомянуть роды *Lens* Medik., *Lathyrus* L., *Melilotus* Mill., *Medicago* L. При этом, если, например, люцерна как растение-фитомелиорант изучена достаточно хорошо, нуту, как фиторемедианту, посвящены единичные публикации [1, 4].

В ряде экспериментов было показано, что совместное использование для восстановления природного потенциала нефтезагрязненных земель бактерий, продуцирующих фитогормоны, и люцерны в качестве фитомелиоранта позволяет повысить эффективность деструкции поллютантов [11–13]. Коллекция Уфимского Института биологии УФИЦ РАН имеет в своем перечне несколько штаммов бактерий родов *Paenibacillus* и *Pseudomonas*, для которых доказана способность стимулировать рост зернобобовых культур и кормовых трав [14]. Цель работы – сравнение эффективности ризоремедиации нефтезагрязненной почвы с использованием в качестве фитомелиорантов устойчивых к засухе растений нута бараньего и люцерны изменчивой с применением инокуляции семян ростстимулирующими бактериями родов *Paenibacillus* и *Pseudomonas*.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальное исследование проводили в рамках вегетационного опыта в 2019 г. В качестве фитомелиорантов были использованы нут бараний *Cicer arietinum* L. сорта Приво 1 и люцерна изменчивая *Medicago varia* Mart. сорта Галия. Семена произведены и предоставлены Башкирским научно-исследовательским институтом сельского хозяйства УФИЦ РАН.

Растения выращивали в сосудах объемом 0.5 л и высотой 14 см, в которые для оптимизации водно-воздушного режима помещали дренаж, а также стеклянные трубочки. Опыт проводили с использованием светодиодной подсветки: плотность потока фотонов ФАР 240 мкмоль/м²/с, фотопериод – 14 ч. Сосуды заполняли почвой, предварительно смешанной с песком (соотношение почва : песок = 9 : 1) и загрязненной товарной нефтью в концентрации 5% по массе. В качестве контроля служили растения, которые росли на незагрязненной нефтью почве. Почва – чернозем обыкновенный, содержание гумуса – 4.2% (по Тюрину), рН – 6.3, обеспеченность подвижными формами (по Чирикову) фосфора – 5.6, калия – 8.2 мг/100 г, содержание общего азота (по Кьельдалю) – 0.5%. Полив осуществляли из расчета 80% ПВ в начале эксперимента, далее – 60% ПВ.

Семена растений стерилизовали замачиванием в 1%-ном растворе перманганата калия в течение 30 мин, после чего 5-кратно промывали большим количеством стерильной водопроводной воды, далее помещали на увлажненную фильтровальную бумагу для проращивания при комнатной температуре. Для посева брали проросшие семена в количестве 4 и 10 шт. на один сосуд для нута и люцерны соответственно. Перед посадкой проростки замачивали на 20 мин в жидкой культуре бактерий, разбавленной водой до титра 10⁶ КОЕ/мл. В опыте использовали следующие ростстимулирующие штаммы бактерий из коллекции Уфимского Института биологии УФИЦ РАН: *Paenibacillus peoriae* АНТ 13, *Pseudomonas laurentiana* АНТ 17, *Pseudomonas koreensis* ИБ-4, *Paenibacillus ehimensis* ИВ 739.

Экспозицию растений нута продолжали в течение 3-х нед, люцерны – 6-ти нед. В конце эксперимента оценивали количество выживших растений, нодуляцию, определяли воздушно-сухую массу побегов и корней. Выживаемость рассчитывали, как отношение числа растений, оставшихся к концу эксперимента, к числу посаженных проростков (%).

Оценку ремедиационных возможностей сельскохозяйственных культур проводили, опираясь на данные остаточного количества углеводородов

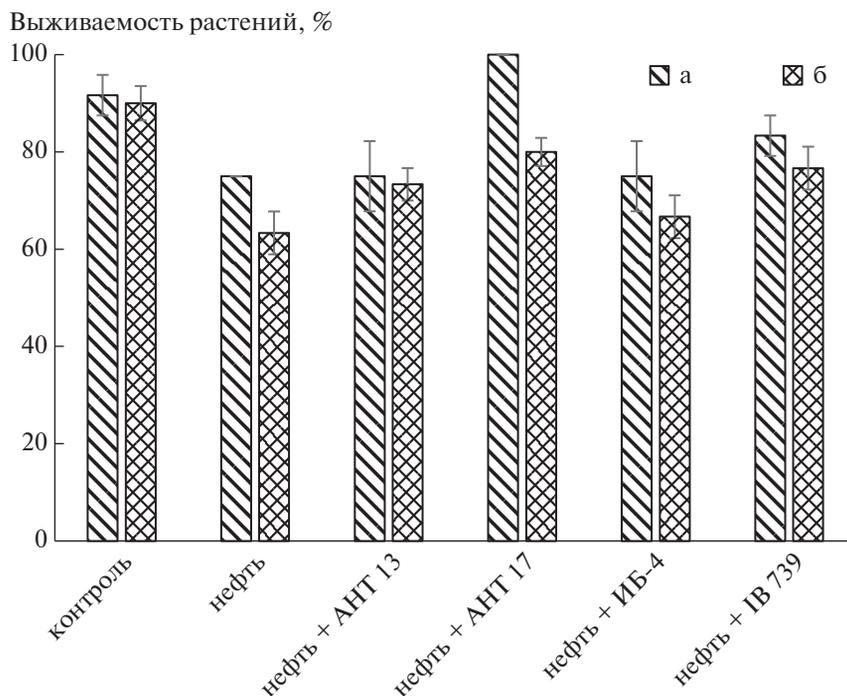


Рис. 1. Влияние интродукции бактерий на выживаемость растений в условиях нефтяного загрязнения: а – нут, б – люцерна.

в почве в конце опыта. Для этого использовали гравиметрический метод, основанный на экстракции нефтепродуктов из почвы гексаном. Эффективность биодegradации (D) рассчитывали по формуле:

$$D (\%) = \frac{C_0 - C_1}{C_0} \times 100,$$

где C_0 – исходная концентрация углеводородов нефти (50 г/кг почвы), C_1 – концентрация углеводородов нефти в образцах в конце эксперимента.

С целью получения образцов для анализа ризосферного грунта корни растений с налипшими на них комочками почвы весом 1 г помещали в колбы, содержащие 100 мл стерильной водопроводной воды, и взбалтывали в течение 3 мин на качалке (180 об./мин). Затем стерильным крючком корни извлекали, а почвенные суспензии в колбах дополнительно перемешивали в течение 5 мин. Учет численности гетеротрофов, олигонитрофилов, микромицетов проводили путем посева разведений почвенной суспензии на общепринятые агаризованные среды [15], углеводородокисляющих микроорганизмов (УОМ) – на питательную среду Раймонда с дизельным топливом в качестве источника углерода [16].

Эксперименты осуществляли в трехкратной повторности, статистическую обработку проводи-

ли с использованием программного обеспечения Microsoft Office Excel. Рассчитаны показатели: среднее \pm стандартная ошибка среднего, произведена оценка достоверности различий по t -критерию Стьюдента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Одной из основных задач проведенных исследований являлась оценка реакции выбранных сельскохозяйственных культур на присутствие в почве нефти. Показано, что выживаемость обоих видов растений на нефтезагрязненной почве снизилась: на 17% – нута и на 27% – люцерны (рис. 1). При этом на фоне нефтяного загрязнения бактериализация семян штаммами *P. peoriae* АНТ 13, *P. laurentiana* АНТ 17, *P. ehimensis* ИБ 739 способствовала повышению выживаемости обеих культур в среднем на 8–25 и 10–17% в вариантах с нутом и люцерной соответственно. При обработке семян нута штаммом *P. laurentiana* АНТ 17 на почве с нефтью выжили все растения, в то время как даже в контрольном варианте (без нефти) этот показатель составил только 92%.

Было отмечено, что на ранних стадиях эксперимента основная масса корней нута в сосудах с нефтью располагалась в верхнем слое почвы – преимущественно 0–8 см (рис. 2а). Несмотря на это, по истечении 3-х нед опыта для нута не уста-

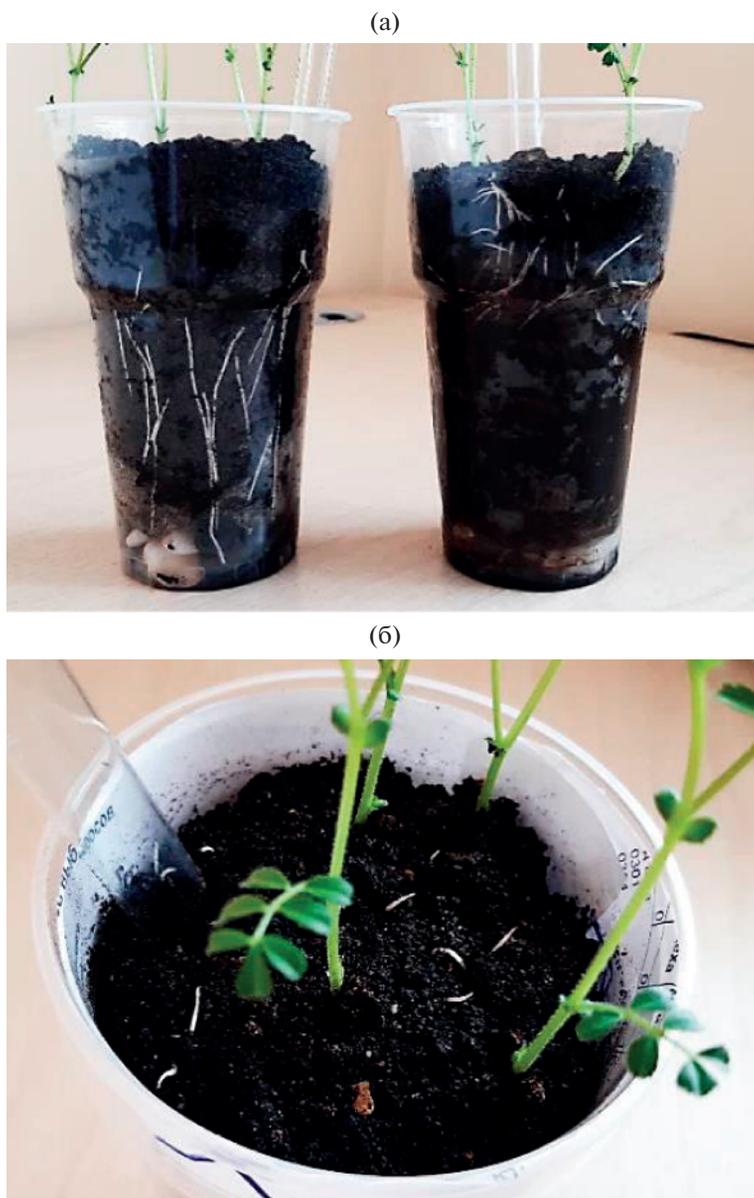


Рис. 2. Развитие корневой системы нута на 6-е сут после помещения проростков в почву: (а) – вид сбоку (слева – контроль, справа – почва с содержанием нефти 50 г/кг), (б) – вид сверху (почва с содержанием нефти 50 г/кг).

новлено статистически значимых различий между сухой массой корней и побегов растений, выросших на незагрязненной почве, и почве, содержащей нефть (табл. 1).

В свою очередь интродукция бактерий в присутствии в почве поллютанта стимулировала рост побегов и корней. У растений нута, обработанных штаммами *P. peoriae* АНТ 13, *P. laurentiana* АНТ 17, *P. koreensis* ИБ-4, масса побега выросла на 14.8–23.1% по сравнению с контролем, увеличение массы корней в вариантах с бактериализацией культурами *P. peoriae* АНТ 13 и *P. laurentiana* АНТ 17 составило 25.7 и 35.5% соответственно.

Токсическое действие нефти на растения люцерны выразалось в первую очередь в существенном замедлении роста побегов. К концу эксперимента в вариантах с загрязненной почвой растения люцерны имели 4 настоящих листа, в варианте без загрязнения сформировалось в среднем 5–6 листьев. Вследствие этого, сухая зеленая масса в варианте, где использовали нефть, уменьшилась по сравнению с контролем в 4.0 раза. Бактеризация помогала растениям справиться со стрессом. Во всех вариантах с использованием штаммов микроорганизмов отмечено увеличение массы надземной части в среднем на 35.3–69.7%

Таблица 1. Влияние нефтяного загрязнения на морфометрические показатели растений нута и люцерны, в том числе в присутствии штаммов ростстимулирующих бактерий

Вариант	Сухая масса побегов, мг	Сухая масса корней, мг	Корень: побег	Клубеньки, шт./растение
	мг/растение			
Нут				
Контроль	54.3 ± 2.3 ^a	28.5 ± 2.1 ^a	0.52	—
Нефть	56.6 ± 1.8 ^a	33.3 ± 3.3 ^{ab}	0.59	—
Нефть + АНТ 13	64.9 ± 2.9 ^b	35.8 ± 3.4 ^b	0.55	—
Нефть + АНТ 17	62.3 ± 2.6 ^b	38.6 ± 2.6 ^b	0.62	—
Нефть + ИБ-4	66.8 ± 2.5 ^b	33.7 ± 4.5 ^{ab}	0.50	—
Нефть + ИВ 739	53.5 ± 2.3 ^a	33.3 ± 4.6 ^{ab}	0.62	—
Люцерна				
Контроль	9.75 ± 0.86 ^a	1.18 ± 0.21 ^a	0.12	6.7 ± 0.2 ^a
Нефть	2.41 ± 0.19 ^b	1.79 ± 0.14 ^b	0.74	2.8 ± 0.2 ^b
Нефть + АНТ 13	3.58 ± 0.27 ^{cd}	2.19 ± 0.20 ^{cd}	0.61	4.3 ± 0.3 ^c
Нефть + АНТ 17	3.56 ± 0.47 ^{cd}	1.80 ± 0.06 ^b	0.51	3.7 ± 0.4 ^{cd}
Нефть + ИБ-4	4.09 ± 0.29 ^c	2.24 ± 0.19 ^c	0.55	3.7 ± 0.4 ^{cd}
Нефть + ИВ 739	3.26 ± 0.26 ^d	1.88 ± 0.12 ^{bd}	0.58	3.3 ± 0.2 ^d

Примечания. 1. Достоверно отличающиеся величины помечены разными буквами ($p \leq 0.05$, t -тест). То же в табл. 2. 2. Прочерк — показатель не определен.

по отношению к варианту с нефтью, но без обработки бактериями. Внешне данный эффект выразился не в приросте количества листьев, а в увеличении размеров листовых пластинок.

Что касается корневой системы люцерны, то в отличие от побегов загрязнение почвы нефтью привело к тому, что ее масса увеличилась в 1.5 раза. Обработка растений такими штаммами как *P. peoriae* АНТ 13 и *P. koreensis* ИБ-4 дополнительно повысила этот показатель у растений еще на 22.3–25.1%.

Таким образом, на нефтезагрязненной почве у нута выявлена тенденция к незначительному увеличению роста как надземной, так и подземной частей растений, следовательно, присутствие нефти практически не повлияло на отношение массы корня к массе побега (табл. 1). В то время как у люцерны этот показатель вырос до 0.74 на почве с нефтью против 0.12 в контрольном варианте. Бактеризация заметнее сказалась на росте побегов растений, чем корней и позволила несколько снизить соотношение корень : побег, что составило 0.51–0.61.

Ранее было показано, что штаммы *P. koreensis* ИБ-4 и *P. ehimensis* ИВ 739 не только улучшают рост бобовых растений, но и стимулируют у них процесс клубенькообразования [14, 17]. Образование первых клубеньков у люцерны в условиях данного опыта отмечено через 2.5 нед после начала эксперимента. Было установлено, что в присутствии нефти нодуляция у люцерны снизилась в 2.4 раза. В вариантах с инокуляцией штаммами бактерий количество клубеньков увеличилось на 17.9–53.6%, но не превысило контроль. На корнях нута клубеньков обнаружить не удалось даже в контрольном варианте. Это связано с тем, что в отличие от люцерны нут не относится к числу широко возделываемых в Республике Башкортостан сельскохозяйственных культур, поэтому в почвах данного региона отсутствуют специфические для этой культуры штаммы клубеньковых бактерий.

Через 3 нед после начала эксперимента было проведено количественное сравнение некоторых физиологических групп микроорганизмов в ризосфере нута, выросшего на контрольной почве и

Таблица 2. Влияние нефтяного загрязнения на численность различных физиологических групп микроорганизмов в ризосфере нута, КОЕ/г

Вариант	Гетеротрофы, $\times 10^7$	Олигонитрофилы, $\times 10^6$	Микромицеты, $\times 10^4$	УОМ, $\times 10^5$
Контроль	3.4 ± 0.7^a	8.0 ± 0.6^a	5.3 ± 0.8^a	4.4 ± 0.9^a
Нефть	8.5 ± 0.7^b	0.8 ± 0.3^b	1.6 ± 0.5^b	18.9 ± 2.3^b
Нефть + АНТ 13	18.6 ± 1.6^{cd}	2.8 ± 0.5^c	9.5 ± 0.9^c	25.3 ± 1.5^c
Нефть + АНТ 17	20.4 ± 1.5^c	1.8 ± 0.4^{de}	7.7 ± 0.8^d	20.8 ± 1.6^b
Нефть + ИБ-4	15.2 ± 0.9^e	1.3 ± 0.4^{bd}	4.5 ± 0.8^a	16.3 ± 1.9^{bd}
Нефть + ИВ 739	15.7 ± 1.4^{de}	2.4 ± 0.5^{ce}	5.9 ± 0.7^a	14.1 ± 1.3^d

почве, содержащей нефть (табл. 2). Показано, что численность представляющей наибольший интерес группы УОМ в варианте с загрязнением нефтью, но без внесения бактерий, выросла по сравнению с контролем в 4.3 раза. Интродукция бактерий практически не повлекла за собой увеличения количества данной группы микроорганизмов, исключение — вариант со штаммом *P. peoriae* АНТ 13.

Отмечено, что в конце опыта количество гетеротрофных микроорганизмов в ризосфере инокулированных растений нута, выросших в присутствии нефти, увеличилось в 2.5 раза по сравнению с контролем, а в случае инокуляции — до $1.5\text{--}2.0 \times 10^8$ КОЕ/г. В противоположность этому, присутствие поллютанта отрицательным образом сказалось на численности азотфиксирующих микроорганизмов: в почве с нефтью их количество сократилось на порядок. При этом в 3-х из 4-х вариантов, в которых вносили дополнительно ростстимулирующие бактерии, олигонитрофилов стало больше в среднем в 2.3–3.5 раза, чем в варианте с нефтью без интродукции. Что касается микроскопических грибов, то загрязнение почвы нефтью привело к снижению численности микромицетов в 3.3 раза. В вариантах, где семена нута были инокулированы штаммами бактерий, численность мицелиальных грибов повысилась до контрольного уровня, а в случае со штаммами *P. peoriae* АНТ 13, *P. laurentiana* АНТ 17 — превысила его в 1.5–1.8 раза.

Выявлено, что степень биодеструкции нефти с использованием нута за 3 нед эксперимента составила 45 против 29% в варианте с люцерной при продолжительности опыта, равной 6-ти нед (рис. 3). Инокуляция растений штаммами бактерий дополнительно способствовала снижению содержа-

ния в почве поллютанта: на 12–14 и на 6–9% для нута и люцерны соответственно. При этом статистически достоверных отличий показателя деструктивной активности варианты с использованием штаммов бактерий между собой не имели.

В целом по показателям роста на нефтезагрязненной почве обоих видов растений наименее эффективным показал себя штамм *P. ehimensis* ИВ 739, наименьшее число выживших растений нута и люцерны отмечено в варианте с использованием штамма *P. koreensis* ИБ-4. Тем не менее, оба вида растений продемонстрировали высокую отзывчивость на бактеризацию в присутствии углеводородов нефти, что в свою очередь повлияло на эффективность процесса фиторемедиации.

При оценке такого важного критерия как выживаемость растений на почвах, загрязненных нефтепродуктами, принято считать, что среднюю и высокую устойчивость демонстрируют культуры, у которых сохраняется свыше 80% растений от количества всходов [6, 18]. Как правило, это многолетние травы семейства мятликовых. В работе [11] оценили устойчивость растений к углеводородному загрязнению в чашках Петри, регистрируя их приживаемость на 10-е сут при концентрации нефти 5% от массы субстрата. В этих исследованиях степень устойчивости люцерны оказалась равной 49%. В нашем опыте при таком же уровне нефтяного загрязнения в течение 1.5 мес. выжили 63% растений данного вида, при этом предпосевная обработка ростстимулирующими штаммами бактерий увеличила данный показатель до 77–80% (рис. 1).

Опубликовано большое количество исследований, ставящих себе целью описать реакцию растений на нефтяные углеводороды в зависимости от видовой принадлежности, массы семян,

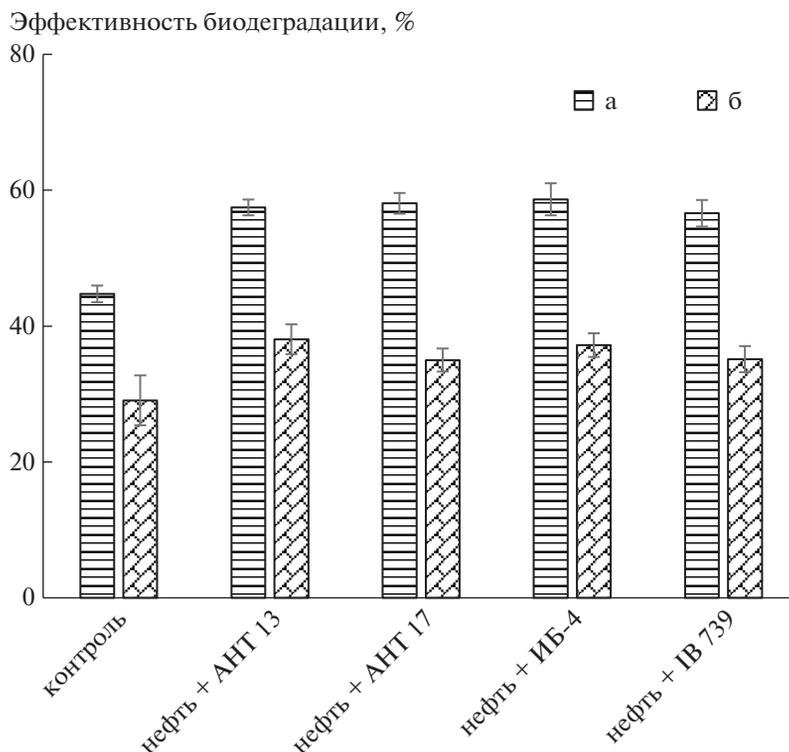


Рис. 3. Биодеструкция нефти при различных вариантах рекультивации: а – нут (3 нед эксперимента), б – люцерна (6 нед эксперимента).

особенностей прорастания, длительности жизненного цикла и т.п. [19, 20]. На сегодняшний день не существует единого мнения, какие именно характеристики семян повышают толерантность растений к загрязнению почвы. В нашем исследовании в начале эксперимента наблюдали относительную устойчивость растений нута к токсичному действию нефти. Это могло быть связано с тем, что масса семян бараньего гороха превосходила массу семян люцерны более чем в 150 раз. Крупные семядоли, выполняя функцию вместилища запасных веществ, позволили растению на начальном этапе развития адаптироваться к стрессовым условиям окружающей среды. Действительно, в течение первых 1.5 нед контаминация почвы углеводородами не влияла на скорость роста растений нута. Но в дальнейшем листья стали терять зеленую окраску и усыхать, начиная с кончиков.

В противоположность этому токсическое действие нефти на культуру люцерны было отмечено уже на этапе появления всходов и выразилось в том, что в несколько раз снизилась скорость роста побегов. В то же время на протяжении всего эксперимента не наблюдали пожелтения и засыхания листьев, хотя многие авторы указывали,

что хлороз является характерной стресс-реакцией люцерны на загрязнение почвы углеводородами [7, 21].

В начале роста растения корневая система обычно развивается более быстрыми темпами, чем надземные органы. В условиях нашего опыта уже на 3-и сут эксперимента на незагрязненной почве корни нута достигли дна сосуда. На почве, содержащей нефть, глубина проникновения корней была в 2 раза меньше. Кроме того, в варианте с загрязнением было выявлено изменение направления роста корней – они появились над поверхностью почвы (рис. 2). Известно, что отрицательное воздействие нефтяного загрязнения на растения связано не только с токсичностью составляющих его компонентов. Оно происходит также и опосредованно через влияние на физико-химические свойства почвы [22, 23]. Корневая система растений вынуждена приспосабливаться к существующим условиям, используя для этого различные механизмы. Внешне это может проявляться как изменение ориентации корней относительно поверхности субстрата [24], гидротропизмом и аэротропизмом [25].

Очевидно, что торможение роста побегов на фоне стресса от присутствия в почве нефти необ-

ходимо растениям, чтобы уменьшить испарение воды и одновременно освободить ресурсы для поддержания роста корней, увеличивая таким образом их поглотительную способность. В нашем опыте растения люцерны изменчивой *Medicago varia* Mart. на почве с нефтью (50 г/кг) демонстрировали задержку роста стеблей, снижение площади листьев и их количества и, как следствие, через 6 нед эксперимента существенное понижение величины общей зеленой массы (табл. 1). По данным литературы, другие виды люцерны также плохо переносят нефть даже в более низких концентрациях [21, 26, 27]. В сравнении с люцерной нут бараний не показал статистически значимых различий между показателями сухой биомассы, сформировавшейся в течение 3-х нед на загрязненной и чистой почве. Ранее уже были получены аналогичные результаты при сравнении устойчивости кормовых трав и зернобобовых растений к нефтяному загрязнению. Было показано, что на начальных этапах развития мелкосеменные бобовые культуры более уязвимы, чем растения с крупными семенами [8].

Одной из основных задач исследования являлось подтверждение возможности повысить эффективность фиторемедиации за счет интродукции бактерий. Установлено, что обработка семян штаммами *P. peoriae* АНТ 13, *P. laurentiana* АНТ 17, *P. koreensis* ИБ-4, *P. ehimensis* ИВ 739 способствовала снижению отрицательного влияния нефти на рост и развитие растений. Совместное использование растений и бактерий для рекультивации почв, загрязненных углеводородами, обусловлено взаимовыгодными отношениями, которые существуют между ними: растение обеспечивает бактерии легкодоступными источниками питания, бактерии помогают растениям выживать в токсичной среде, стимулируя их рост, а также снижая концентрацию вредных веществ в почве [28]. Известно, что растения избирательны в отношении микроорганизмов, образующих микробиом их ризосферы [29, 30]. Литературные данные подтверждают эффективность использования биопрепаратов на основе штаммов *Pseudomonas* совместно с растениями люцерны посевной *Medicago sativa* L. или люцерны серповидной *Medicago falcata* L. при восстановлении нефтезагрязненных земель [12, 13].

В ряде работ [30, 31] отмечено, какую важную роль играют органические загрязнители в формировании состава микробных сообществ ризосферы. С одной стороны, они могут быть токсичны, подавляя определенные почвенные микроорганизмы, с другой стороны, загрязнители могут служить источником питания для членов сообще-

ства. Полученные нами данные по численности азотфиксирующих и углеводородокисляющих микроорганизмов в почве, содержащей нефть, могут служить наглядной иллюстрацией данного утверждения (табл. 2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изучение возможности использования для восстановления нефтезагрязненной почвы в качестве фитомелиорантов растений нута бараньего и люцерны изменчивой показало, что выбранные тест-культуры демонстрировали среднюю устойчивость к концентрации нефти в почве 50 г/кг. Токсическое действие нефти на растения выразилось в снижении выживаемости обеих тест-культур. При этом установлено, что нут и люцерна значительно отличались по тому, какие морфологические изменения происходили с ними под воздействием нефти.

Полученные результаты показали, что применение инокуляции семян штаммами ростстимулирующих бактерий родов *Paenibacillus* и *Pseudomonas* способствовало повышению устойчивости бобовых культур к действию поллютанта, стимулировало их рост в неблагоприятных условиях, а также ускоряло процесс деструкции нефти. В рамках данного вегетационного опыта наиболее значительного снижения содержания углеводородов в почве (более чем в 2 раза) удалось достичь в варианте с использованием нута бараньего и ассоциированных с ним штаммов бактерий: по истечении 3-х нед эксперимента количество углеводородов в почве составило 20.7–21.7 г/кг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Varazi T., Kurashvili M., Pruidze M., Khatishashvili G., Gagelidze N., Adamia G., Zaalishvili G., Gordeziani M., Sutton M. A new approach and tools for perfecting phytoremediation technology // Am. J. Environ. Protect. 2015. V. 4. № 3–1. P. 143–147. <https://doi.org/10.11648/j.ajep.s.2015040301.32>
2. Riskuwa-Shehu M.L., Ijah U.J.J., Manga S.B., Bilbis L.S. Evaluation of the use of legumes for biodegradation of petroleum hydrocarbons in soil // Inter. J. Environ. Sci. Technol. 2017. V. 14. P. 2205–2214. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1303-5>
3. Hall J., Soole K., Bentham R. Hydrocarbon phytoremediation in the family Fabaceae – a review // Inter. J. Phytoremediat. 2011. V. 13. № 4. P. 317–332. <https://doi.org/10.1080/15226514.2010.495143>
4. Mishra A., Nautiyal C.S. Functional diversity of the microbial community in the rhizosphere of chickpea grown in diesel fuel-spiked soil amended with *Trichoderma reesei* using sole-carbon-source utilization profiles // World J. Microbiol. Biotechnol. 2009. V. 25.

- Р. 1175–1180.
<https://doi.org/10.1007/s11274-009-9998-1>
5. Степанова А.Ю., Орлова Е.В., Терешонок Д.В., Долгих Ю.И. Получение трансгенных растений люцерны посевной (*Medicago sativa* L.) для повышения эффективности фиторемедиации нефтезагрязненных почв // Экол. генетика. 2015. Т. 13. № 2. С. 127–135.
 6. Мухаярова Е.И. Подбор и использование травосмесей оптимального состава для проведения биологической рекультивации на территории СЗФО // Наука и технол. трубопровод. транспорта нефти и нефтепродуктов. 2014. № 4 (16). С. 98–103.
 7. Гафарова Б.Т., Мамедова А.О. Исследование индикативных свойств *Medicago sativa* L. в условиях нефтяного загрязнения // Бюл. науки и практ. 2019. Т. 5. № 2. С. 19–25.
<https://doi.org/10.33619/2414-2948/39/03>
 8. Высоцкая Л.Б., Архипова Т.Н., Кузина Е.В., Рафикова Г.Ф., Ахтямова З.А., Иванов Р.С., Тимерзалина Л.Н., Кудоярова Г.Р. Сравнение реакции растений различных видов на нефтяное загрязнение // Биомика. 2019. Т. 11(1). С. 86–100.
<https://doi.org/10.31301/2221-6197.bmcs.2019-06>
 9. Елибай Е., Садыбекова Л.С., Кулкеев Е.Е., Толтаева Б. Урожайность и экономическая эффективность возделывания нута в условиях юга Казахстана // Евраз. союз ученых. 2016. № 2–5 (23). С. 62–64.
 10. Асаналиев А.Ж., Султанбаева В.А., Хегай С.В., Содомбеков И.С. Продуктивность нута в зависимости от сроков и схем посева в предгорной зоне Чуйской долины // Усп. совр. естествознания. 2017. № 3. С. 46–50.
 11. Отрошко Д.Н., Волченко Н.Н., Самков А.А., Худокормов А.А. Отбор растений и микроорганизмов для дальнейшего применения в ризоремедиации // Теор. и прикл. экол. 2016. № 2. С. 86–92.
 12. Agnello A.C., Bagard M., Van Hullebusch E.D., Esposito G., Huguenot D. Comparative bioremediation of heavy metals and petroleum hydrocarbons cocontaminated soil by natural attenuation, phytoremediation, bioaugmentation and bioaugmentation-assisted phytoremediation // Sci. Total Environ. 2016. V. 563–564. P. 693–703.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.061>
 13. Галкина Н.А., Назаренко О.А., Шафран В.Н., Сулова М.В., Вяткин К.А. Эколого-экономическая оценка технологии рекультивации нефтезагрязненных земель с использованием эффективного биопрепарата // Изв. Самар. НЦ РАН. 2017. Т. 19. № 2 (2). С. 244–248.
 14. Миннебаев Л.Ф., Кузина Е.В., Рафикова Г.Ф., Чанышев И.О., Логинов О.Н. Продуктивность бобово-ризобиального комплекса под влиянием ростстимулирующих штаммов микроорганизмов // Сел.-хоз. биол. 2019. Т. 54. № 3. С. 481–493.
<https://doi.org/10.15389/agrobiol.2019.3.481rus>
 15. Дзержинская И.С. Питательные среды для выделения и культивирования микроорганизмов. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2008. 348 с.
 16. Raymond R.L. Microbial oxidation of *n*-paraffinic hydrocarbons // Develop. Ind. Microbiol. 1961. V. 2. P. 23–32.
 17. Кузина Е.В., Рафикова Г.Ф., Столярова Е.А., Мухаматдырова С.Р., Логинов О.Н. Перспектива использования бактериальных препаратов против семенной инфекции нута // Земледелие. 2020. № 2. С. 44–47.
<https://doi.org/10.24411/0044-3913-2020-10211>
 18. Rutherford P.M., Dickinson S.J., Arocena J.M. Emergence, survival and growth of selected plant species in petroleum-impacted flare pit soils // Can. J. Soil Sci. 2005. V. 85. № 1. P. 139–148.
<https://doi.org/10.4141/S03-088>
 19. Robson D.B., Germida J.J., Farrell R.E., Knight D.J. Hydrocarbon tolerance correlates with seed mass and relative growth rate // Bioremed. J. 2004. V. 8. № 3–4. P. 185–199.
<https://doi.org/10.1080/10889860490887536>
 20. Potashev K., Sharonova N., Breus I. The use of cluster analysis for plant grouping by their tolerance to soil contamination with hydrocarbons at the germination stage // Sci. Total Environ. 2014. V. 485–486. P. 71–82.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.03.067>
 21. Minoui S., Minai-Tehrani D., Shahriari M. Phytoremediation of crude oil-contaminated soil by *Medicago sativa* (Alfalfa) and the effect of oil on its growth // Phytoremed. Green Energy. 2015. P. 123–129.
https://doi.org/10.1007/978-94-007-7887-0_8
 22. Каменщикова В.И. Влияние техногенного загрязнения на биофизические и биохимические свойства дерново-подзолистых почв таежно-лесной зоны // Вестн. Перм. ун-та. Сер. Биология. 2012. № 2. С. 45–50.
 23. Abosedo E.E. Effect of crude oil pollution on some soil physical properties // J. Agric. Vet. Sci. 2013. V. 6. № 3. P. 14–17.
 24. Буньо Л.В., Цвильнюк О.Н. Особенности морфогенеза осоки шершавой (*Carex hirta* L.) на нефтезагрязненной почве // Сибир. экол. журн. 2015. Т. 22. № 5. С. 800–809.
<https://doi.org/10.15372/sej20150512>
 25. Muthert L.W.F., Izzo L.G., Van Zanten M., Aronne G. Root tropisms: investigations on earth and in space to unravel plant growth direction // Front. Plant Sci. 2019. V. 10. P. 1807.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01807>
 26. Дубровская Е.В., Позднякова Н.Н., Муратова А.Ю., Голубев С.Н., Бондаренкова А.Д., Турковская О.В. Влияние нефтяного загрязнения на растения в условиях пониженной влажности // Экобиотехнология. 2019. Т. 2. № 3. С. 391–401.
<https://doi.org/10.31163/2618-964x-2019-2-3-391-401>

27. Terek O., Laphyna O., Velychko O., Bunyo L., Dovgaiuk-Semeniuk M. Crude oil contamination and plants // J. Central Eur. Green Innov. 2015. V. 3. № 2. P. 175–184.
<https://doi.org/10.22004/ag.econ.206656>
28. Khan S., Afzal M., Iqbal S., Khan Q.M. Plant-bacteria partnerships for the remediation of hydrocarbon contaminated soils // Chemosphere. 2013. V. 90. № 4. P. 1317–1332.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.09.045>
29. Donate-Correa J., Leon-Barrios M., Perez-Galdona R. Screening for plant growth-promoting rhizobacteria in *Chamaecytisus proliferus* (tagasaste), a forage tree-shrub legume endemic to the Canary Islands // Plant and Soil. 2005. V. 266. P. 261–272.
<https://doi.org/10.1007/s11104-005-0754-5>
30. Jambon I., Thijs S., Weyens N., Vangronsveld J. Harnessing plant–bacteria–fungi interactions to improve plant growth and degradation of organic pollutants // J. Plant Interact. 2018. V. 13. № 1. P. 119–130.
<https://doi.org/10.1080/17429145.2018.1441450>
31. Назаров А.В. Влияние нефтяного загрязнения почвы на растения // Вестн. Перм. ун-та. 2007. № 5 (10). С. 134–141.

Efficiency of Associations of Legume Plants and Growth-Stimulating Bacteria for Restoration of Oil-Contaminated Soils

E. V. Kuzina^a, G. F. Rafikova^{a, #}, E. A. Stolyarova^a, and O. N. Loginov^a

^a Ufa Institute of Biology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre of RAS
 prosp. Oktyabrya 69, Ufa 450054, Russia

[#]E-mail: lab.biotech@yandex.ru

The stability of chickpeas *Cicer arietinum* L. and variable alfalfa *Medicago varia* Mart. was studied to petroleum hydrocarbons in a concentration of 5% by weight in the conditions of vegetation experiment. Data describing the effect of the pollutant on morphometric and morphological parameters of plants are presented. The positive effect of pre-sowing treatment with growth-stimulating bacteria *Paenibacillus peoriae* ANT 13 and *Pseudomonas laurentiana* ANT 17 on the survival, growth and development of plants in conditions of oil pollution was established. It was shown that the degree of biodegradation of oil using chickpeas was 45%, in the variant with alfalfa – 29%, while bioaugmentation contributed to reducing the content of hydrocarbons in the soil by an additional 6–14%.

Key words: phytoremediation, phytotoxicity, growth-stimulating bacteria, oil, *Cicer arietinum* L., *Medicago varia* Mart.