

ISSN 0002-1881

Апрель 2024

Номер 4



АГРОХИМИЯ



НАУКА

— 1727 —

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 4, 2024

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

Плодородие почв

- Миграция нитратного азота по профилю почвы
О. В. Волынкина, А. Н. Копылов 3
- Динамика гумусного состояния чернозема южного при длительном применении минеральных удобрений в условиях степного Поволжья
Д. Ю. Журавлев, Т. М. Ярошенко, Н. Ф. Климова, Л. Б. Сайфуллина 8
-

Удобрения

- Влияние многолетнего применения минеральных удобрений и навоза на агрохимические свойства серой лесной почвы, продуктивность культур и секвестрацию углерода
Н. Б. Зинякова, Д. А. Соколов, Т. Н. Лебедева, С. Н. Удадьцов, В. М. Семенов 14
- Агрономическая эффективность мочевины пролонгированного действия при выращивании яровой пшеницы
В. М. Лапушкин, М. А. Волкова, А. А. Лапушкина, С. П. Торшин, Ф. Г. Игралиев, А. М. Норов, Д. А. Пагалешкин, П. С. Федотов, В. В. Соколов, И. М. Кочетова, Е. А. Рыбин 35
- Эффективность и продолжительность действия частиц отсева доломита, используемого для мелиорации кислых почв. эмпирические модели процесса подкисления дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы (по данным полевого опыта)
А. В. Литвинович, А. В. Лаврищев, А. О. Ковлева, Ю. В. Хомяков, В. И. Дубовицкая, В. М. Буре 41
- Влияние некорневых подкормок органоминеральными удобрениями на содержание хлорофилла в листьях ячменя и его связь с показателями качества зерна
Е. Н. Носкова, Е. М. Лисицын 49
- Влияние разных способов внесения лигногумата на качество продукции зеленных культур и лекарственных растений
Е. Б. Пашкевич, Г. Е. Ларина, М. В. Парахина 60
-

Агроэкология

- Влияние удобрения, норм высева бобового компонента и погодных условий на урожайность и накопление растительных остатков люпино-злаковых смесей на зерно в центре Нечерноземья
В. В. Конончук, С. М. Тимошенко, Т. О. Назарова, В. Д. Штырхунов, Е. А. Тулинова, Т. В. Смолина, Г. Б. Морозова, Е. А. Комиссарова 69
- Элементный состав и структурные особенности гуминовых кислот пойменных почв дельты реки Селенги
Е. Ю. Мильхеев, Н. Д. Балданов 78
- Влияние селена на урожай и аминокислотный состав зерна яровой пшеницы в оптимальных условиях водоснабжения и при засухе
И. И. Серегина 86
-

Экотоксикология

- Элементный состав листьев березы повислой (*Betula pendula* Roth) в районе золоторудного месторождения Забайкалья
В. П. Макаров, Р. А. Филенко, И. Е. Михеев, Т. В. Желибо, Е. А. Банщикова 95
-
-

Contents

No. 4, 2024

EXPERIMENTAL ARTICLES

Soil Fertility

- Migration of Nitrate Nitrogen by Soil Profile
O. V. Volynkina, A. N. Kopylov 3
- Dynamics of the Humus State of Southern Chernozem with Prolonged Use of Mineral Fertilizers in the Conditions of the Steppe Volga Region
D. Y. Zhuravlev, T. M. Yaroshenko, N. F. Klimova, L. B. Saifullina 8
-

Fertilizers

- Effects of Long-Term Application of Mineral Fertilizers and Manure on Agrochemical Properties of Gray Forest Soil, Crops Productivity and Carbon Sequestration
N. B. Zinyakova, D. A. Sokolov, T. N. Lebedeva, S. N. Udal'tsov, V. M. Semenov 14
- Effectiveness of Long-Acting Urea in the Growing of Spring Wheat
V. M. Lapushkin, M. A. Volkova, A. A. Lapushkina, S. P. Torshin, F. G. Igraliev, A. M. Norov, D. A. Pagaleshkin, P. S. Fedotov, V. V. Sokolov, I. M. Kochetova, E. A. Rybin 35
- Effectiveness and Duration of Action of Dolomite Screening Particles Used for Reclamation of Acidic Soils. Empirical Models of the Acidification Process of Sod-Podzolic Light Loamy Soil (according to Field Experience)
A. V. Litvinovich, A. V. Lavrishchev, A. O. Kovlev, Yu. V. Khomyakov, V. I. Dubovitskaya, V. M. Bure 41
- Effect of Top-Dressing on Chlorophyll Content in Barley Leaves and Its Relation to Grain Quality Parameters
E. N. Noskova, E. M. Lisitsyn 49
- Influence of Different Methods of Application of Lignogumate on the Product Quality of Green Crops and Medicinal Plants
E. B. Pashkevich, G. E. Larina, M. V. Parachina 60
-

Agroecology

- Effect of Fertilizers, Seeding Rates of the Legume Component and Weather Conditions on Yield and Accumulation of Plant Residues of Lupine-Cereal Mixtures on Grain in the Center of the Non-Chernozem Region
V. V. Kononchuk, S. M. Timoshenko, T. O. Nazarova, V. D. Shtyrkhunov, E. A. Tulinova, T. V. Smolina, G. B. Morozova, E. A. Komissarova 69
- Elemental Composition and Structural Features of Humic Acids from Floodplain Soils of the Selenga River Delta
E. Y. Milkheev, N. D. Baldanov 78
- Influence of Selenium on the Yield and Content of the Amino Acid Composition of Spring Wheat Grain under Optimal Conditions of Water Supply and during Drought
I. I. Seregina 86
-

Ecotoxicology

- Elemental Composition of the Leaves of the Hanging Birch (*Betula pendula* Roth) in the Area of the Transbaikalia Gold Deposit
V. P. Makarov, R. A. Filenko, I. E. Mikheev, T. V. Zhelibo, E. A. Banshchikova 95
-
-

УДК 641.416.1:631.445.41

МИГРАЦИЯ НИТРАТНОГО АЗОТА ПО ПРОФИЛЮ ПОЧВЫ[§]

© 2024 г. О. В. Волынкина^{1,*}, А. Н. Копылов¹

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

*E-mail: volynkina.o@bk.ru

В выщелоченном малогумусном среднесуглинистом черноземе центральной зоны Курганской обл. отмечены потери нитратного азота через вымывание с осадками вниз по профилю почвы. Потери возрастали при применении повышенных доз азотного удобрений, а также в вариантах при одностороннем применении азотных удобрений.

Ключевые слова: чернозем выщелоченный малогумусный среднесуглинистый, миграция нитратного азота по профилю почвы, баланс азота, урожайность культур, зернопропашной севооборот, бессменная пшеница после стерни.

DOI: 10.31857/S0002188124040014, EDN: dnajoi

ВВЕДЕНИЕ

Азотный фонд почвы определяется величиной содержания валового азота, который находится в тесной связи с содержанием гумуса, с урожайностью связано только количество почвенного нитратного азота. Основная часть азота почвы находится в органической форме, а на минеральные формы приходится всего 1–3% [1]. Среди разных видов почв наиболее благоприятный для растений азотный режим почвы складывается на черноземах, которые занимают до 50% пахотных земель России, на них производится до 75% валовой продукции [2]. Хорошая растворимость и большая подвижность нитратов в почве приводит к их потерям через вымывание вниз по профилю почвы. Размеры миграции нитратного азота регулируются гранулометрическим составом почвы и технологией возделывания сельскохозяйственных культур [3]. При орошении потери нитратов бывают гораздо больше [4–6].

[§] Исследование выполнено в Курганском научно-исследовательском институте сельского хозяйства – филиале УрФАНИЦУРО РАН – в лабораториях агрохимии и земледелия в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования по теме № 0532-2021-0002 “Усовершенствовать систему адаптивно-ландшафтного земледелия для Уральского региона и создать агротехнологии нового поколения на основе минимизации обработки почвы, диверсификации севооборотов, рационального применения пестицидов и биопрепаратов, сохранения и повышения почвенного плодородия и разработать информационно-аналитический комплекс компьютерных программ, обеспечивающий инновационное управление системой земледелия”.

Ежегодное применение азотных удобрений перед посевом культур локальным способом дисковой сеялкой СЗ-3.6 на 4–5 см обогащает почву нитратами. При достаточном количестве осадков определенная доля нитратного азота опускается ниже корнеобитаемого слоя почвы, особенно при повышенных дозах удобрения. Миграция растворенных в воде нитратов по профилю почвы происходит посредством диффузии жидкой и газообразной фаз влаги, а также большое значение имеют капиллярное и гравитационное перемещение воды вниз по профилю почвы, что описано в литературе [7–11].

В исследованиях Курганского НИИСХ ранее отмечено промывание нитратов в глубину профиля почвы до 2–3-х м по наблюдениям в стационаре с зернопропашным севооборотом (кукуруза–две пшеницы–овес) [12]. В этом опыте изучали состав удобрения и дозы азота, сначала в условиях севооборота, позднее – в посевах бессменной пшеницы. В эксперименте отбор почвенных проб вели весной до внесения новых порций удобрений. Различия результатов весеннего и осеннего отбора почвы по накоплению нитратного азота под пшеницей после пара на производственных участках северо-западной зоны Курганской обл. показаны в методических рекомендациях ФГБУ САС “Шадринская”. Большинство результатов анализа почвенных образцов в этом поле зернопарового севооборота показало, что определение содержания нитратного азота осенью давало более высокие показатели [13], по-видимому, за счет дополнительной летней текущей нитрификации.

Новые наблюдения за содержанием нитратного азота на глубине 3 м проведены в Курганском НИИСХ в 2014, 2015 и 2021 гг. в вышеупомянутом стационарном опыте, где зернопропашной севооборот (1971–1998 гг.) заменен в 1999–2021 гг. бессменной пшеницей после стерневого фона. Такую технологию необходимо изучить, т.к. она распространилась в производственной практике.

Цель работы – определение размеров потерь нитратного азота в выщелоченном черноземе под посевом бессменной пшеницы в условиях Центрального опытного поля Курганского НИИСХ.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования – выщелоченный чернозем маломощный малогумусный среднесуглинистый. Агрохимические свойства почвы в слое 0–20 см: pH_{KCl} 6.2–6.4 при закладке и 5.0–5.2 – в настоящее время, содержание гумуса – 4.5%, суммы кальция и магния – 20–22 мг-экв/100 г, общего азота – 0.20%, общего фосфора – 0.07%, содержание подвижных P_2O_5 и K_2O – 40 и 250–300 мг/кг соответственно. Удобрения (аммиачную селитру и аммофос) вносили до посева дисковой сеялкой СЗ-3.6 на глубину 4–5 см. Определение содержания нитратного азота провели в 1-метровом слое почвы, либо в 3-метровом. Количество среднегодовых осадков в центральной зоне Курганской обл. равно 350 мм, за вегетацию (май–август) – 190 мм.

В эксперименте сравнили количество нитратов в 3-метровом слое почвы на фоне без удобрения, при разном составе удобрения и возрастающих дозах азотного удобрения. Стационарному опыту 51 год. В течение 28 лет (1971–1998 гг.) исследование вели в севообороте кукуруза–две пшеницы–овес при ежегодной вспашке, а в 1999–2021 гг. – в посевах бессменной пшеницы после стерни. Почву отбирали весной перед внесением новых доз

удобрения, т.е. определяли остаточное количество удобрения. Содержание подвижного P_2O_5 в слое 0–20 см почвы под влиянием ежегодного применения суперфосфата в севообороте и аммофоса в 2008–2021 гг. в посеве бессменной пшеницы повысилось с 40 до 80 мг/кг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ миграции нитратного азота по профилю почвы под посевом бессменной пшеницы подтвердил выявленные ранее в годы севооборота закономерности. На систематически удобренном фоне остаточные количества нитратного азота за небольшими исключениями (прохладная весна в 2018–2019 гг.) были больше, чем в контроле. При дозах N40–60 на фосфорном фоне чаще количество нитратов в 1-метровом слое по обеспеченности растений азотом приближалось к оптимуму (75–80 кг/га). В среднем за 6 лет за период с 2016 по 2021 г. количество нитратного азота в 1-метровом слое почвы составило 50 кг/га без удобрений и 76 кг/га – при внесении N40–60P20 (табл. 1).

Отбор образцов на глубину 3 метра позволил оценить размеры потерь азота через вымывание нитратов с осадками во 2-й и 3-й метры почвенного профиля. В табл. 2 показано содержание N-NO₃ в 3-метровом слое выщелоченного чернозема в 2014 и 2021 гг.

Отмечено, что за 7 лет значительно возросло количество нитратного азота в 3-метровом слое, особенно при дозе N60P20. За эти годы в теплое время года (май–сентябрь) выпало в сумме 1470 мм осадков, в среднем за год – 210 мм. Во 2-й и 3-й метры профиля почвы попало 60% нитратного азота в 2014 г. и 42% – в 2021 г. в контроле, на фоне внесения N40P20–45 и 37 и N60P20–59 и 45%.

Таблица 1. Содержание N-NO₃ в 1-метровом слое почвы, кг/га

Вариант	2015 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.	Среднее
Контроль	35	54	41	48	48	71	50
N40–60P20	110	82	53	54	69	90	76
<i>HCP</i> ₀₅				17			

Таблица 2. Миграция нитратного азота при внесении разных доз аммиачной селитры, кг/га

Слой почвы, см	Контроль		N20P20		N40P20		N60P20	
	2014 г.	2021 г.	2014 г.	2021 г.	2014 г.	2021 г.	2014 г.	2021 г.
0–100	30	71	47	44	72	104	51	108
100–200	19	29	21	20	30	26	42	52
200–300	25	23	21	27	28	34	31	38
0–300	74	123	89	91	130	164	124	198

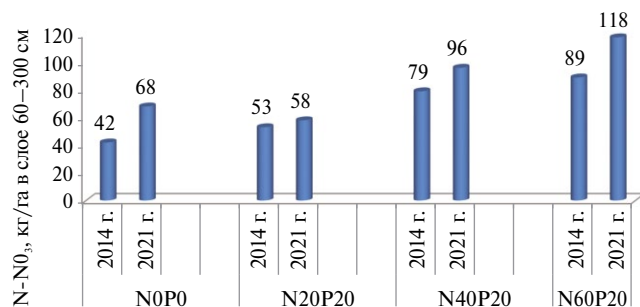


Рис. 1. Изменение количества нитратного азота в слое почвы 60–300 см за период с 2014 по 2021 гг. при внесении разных доз азота, кг/га.

Основная масса корней размещается в верхнем слое 0–60 см почвы. Опасно, если за счет осадков нитратный азот опускается ниже корнеобитаемого слоя почвы. Показано, что за 7 лет при внесении малой дозы азотного удобрения изменение суммарного содержания нитратного азота в слое 60–300 см было небольшим (рис. 1).

В контроле и при внесении доз N40–60P20 наблюдали существенное увеличение суммарного содержания нитратного азота, но распределение нитратного азота в слое 0–300 см по глубине показало, что в контроле ниже 60 см его было 56% в 2014 г. и 55% – в 2021 г., при внесении N40P20–54 и 55% и N60P20–72 и 60% соответственно. Необходимо было найти причину увеличения данного показателя, для чего составили баланс азота за 7-летний период.

Основной причиной была невысокая урожайность бессменной пшеницы после стерни. Играли роль следующие факторы: среднесуглинистый гранулометрический состав почвы, величина доз азота в технологии и повторение июньских засух, которые отмечены за 7 лет 4 раза с осадками в июне, равными 6–30 мм. В среднем за 7 лет продуктивность повторных посевов пшеницы после стерни была невысокой: 9.8 ц зерна/га в контроле и 13.6,

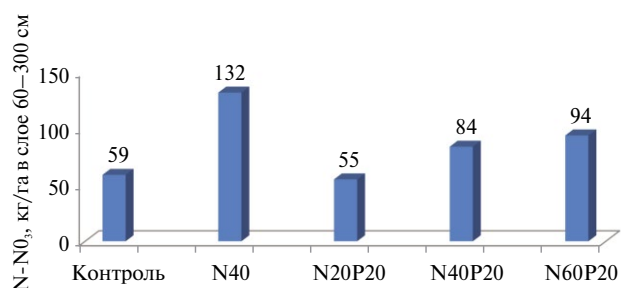


Рис. 2. Количество нитратного азота в слое 60–300 см почвы под посевом бессменной пшеницы при применении разного состава удобрения и возрастающих доз азота, кг/га (2015 г.).

15.2, 15.3 при внесении доз N20–40–60P20 соответственно. Суммарный вынос азота зерном за 7 лет (солому не отчуждали с поля) был равен 133 в контроле, а в вариантах с удобрениями – 179, 238 и 248 кг/га. Внесено было в удобренных вариантах 140, 280 и 420 кг азота/га. Начиная со второй дозы, баланс азота становился положительным, в варианте N40–60P20 в сумме за 7 лет он составил 42 и 172 кг/га (табл. 3).

Лишний азот, не использованный растениями, с осадками мигрировал вниз по профилю почвы. Наибольшими оказались потери в варианте применения дозы азота N60P20.

При анализе содержания нитратного азота в 3-метровом слое почвы в 2015 г. обнаружено, что при одной и той же дозе внесения N40 потери от вымывания нитратов существенно снижались, если азот вносили в сочетании с фосфором (рис. 2).

В слое почвы 0–300 см в 5-ти вариантах находилось нитратного азота 82, 173, 80, 125 и 223 кг/га, ниже 60 см в контроле мигрировало 72% от суммарного количества, 76% – при внесении N40 и 69, 67, 42%, если применяли дозы N20–40–60P20.

Такая закономерность отмечена в опыте еще в годы севооборота. Поскольку почва бедна подвижным фосфором (40 мг/кг), одно азотное удобрение

Таблица 3. Баланс азота за 7-летний период наблюдений за миграцией нитратного азота по профилю почвы (2014–2021 гг.)

Вариант	Урожайность, т/га	Содержание азота в зерне, %	Вынос азота за год, кг/га	Вынос азота за 7 лет, кг/га	Внесено азота за 7 лет, кг/га	Баланс азота за 7 лет, кг/га	Баланс азота за год, кг/га
Контроль	0.98	1.94	19.0	133	0	–133	–19.0
N20P20	1.36	1.84	25.0	175	140	–35	–5
N40P20	1.52	2.24	34.0	238	280	42	6
N60P20	1.53	2.32	35.5	248	420	172	25

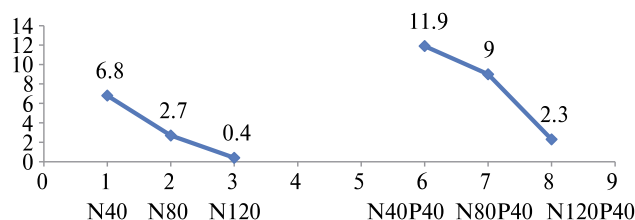


Рис. 3. Предельные прибавки урожайности сухой массы кукурузы при увеличении доз азотного удобрения с шагом N40 без внесения фосфора и на фоне P40, ц/га (контроль – 42 ц/га, $HCP_{05} = 8.0$), (1971–1998 гг.).

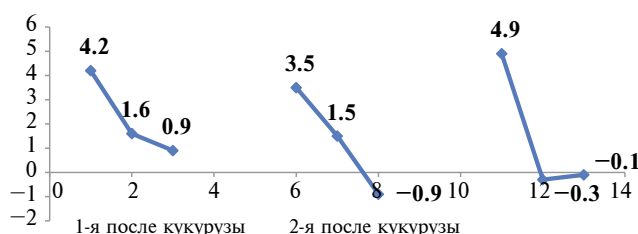


Рис. 4. Предельные прибавки урожайности зерновых культур в севообороте кукуруза–пшеница–пшеница–овес при применении возрастающих доз азота с шагом N20 на фоне внесения P40 (1971–1998 гг., урожайность в контроле: 1-я и 2-я пшеница после кукурузы – 15.8, овес – 23.8 ц/га; $HCP_{05} = 1.1–2.3$).

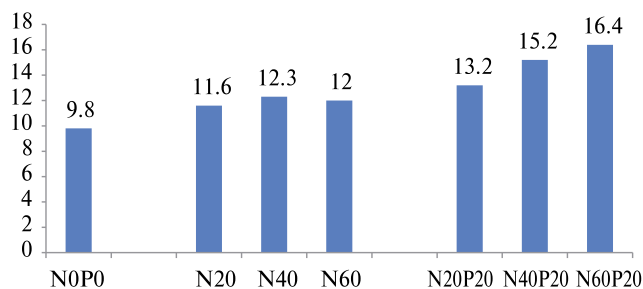


Рис. 5. Влияние состава удобрения и доз азота на урожайность бессменной пшеницы после стерни (1999–2020 гг.), ($HCP_{05} = 1.7$ ц/га).

слабо влияло на величину урожая. В посеве кукурузы при одностороннем азотном удобрении постепенное повышение дозы азота от N40 до N80 и N120 было нецелесообразным. При внесении азотно-фосфорного удобрения эффективность каждой из 3-х доз азота с шагом N40 имела совсем иную характеристику. Полезными были 1-я и 2-я дозы азота. На рис. 3 приведены предельные прибавки урожая сухого вещества кукурузы от каждой из 3-х доз при увеличении дозы удобрения на N40.

Под зерновые культуры вносили N20–40–60. Характер действия этих доз был таким же: значительно больше было действие азота с фосфором

по сравнению с внесением одной аммиачной селитры. На рис. 4 показано влияние только азотно-фосфорного удобрения при применении 3-х возрастающих доз азота.

Аналогично предельные прибавки урожайности пшеницы в севообороте были выше при внесении первой дозы N20, чем при 2-х последующих. Для овса эффективной была только 1-я доза азота. Менее активно использованный азот постепенно мигрировал в нижние слои почвы.

Такая же закономерность проявилась во влиянии разного состава удобрения на урожайность бессменной пшеницы после стерни. Кроме этого, было очевидно, что урожайность пшеницы в повторных посевах после стерни стала заметно меньше по сравнению с ее продуктивностью в севообороте при вспашке, где сбор зерна пшеницы в контроле составил 15.8 ц/га и 23.8 ц/га – овса. Бессменная пшеница после стерни в среднем за 1999–2020 гг. имела урожайность зерна 9.8 ц/га в варианте без удобрений и 11.6–16.4 ц/га – в вариантах их внесения (рис. 5).

В повторных посевах пшеницы среди вариантов применения удобрений существенно улучшалось рост растений и формирование более высоких урожаев совместное внесение азотно-фосфорных удобрений. При применении фосфорного удобрения явно эффективным было увеличение дозы азота от N20 до N40, что не было отмечено при одностороннем азотном удобрении; увеличение дозы до N60 давало эффект лишь во влажные годы, которые за 1999–2020 гг. наблюдались лишь 8 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что на выщелоченном черноземе с низким содержанием подвижного фосфора (40 мг/кг) применение только азотного удобрения действовало на урожай слабо и вело к миграции более высоких количеств неиспользованных растениями нитратов вниз по профилю почвы, чем при совместном применении азота с фосфором.

Продуктивность культур на выщелоченном черноземе, бедном подвижным фосфором, была значительно больше на фоне применения азотно-фосфорного удобрения. В специальных опытах Курганского НИИСХ показано, что под кукурузу и зерновые культуры достаточно вносить P15–20 в рядки при посеве. При применении удобрения до посева рекомендуют дозы P20–30. Оптимальные дозы азота в составе азотно-фосфорного удобрения на Центральном опытном поле Курганского НИИСХ для пропашных культур составили N50–60, для пшеницы после непаровых и небобовых предшественников – N20–30–40,

для овса – N20–25. При повышении доз азота сверх оптимального количества часть нитратного азота мигрировала вниз по профилю почвы, приводя к нерациональным затратам средств химизации. Названные дозы рекомендованы для аналогичных почвенно-климатических условий, какие были в опыте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Онищенко Л.М.* Агрохимические основы воспроизводства плодородия чернозема выщелоченного Западного Предкавказья и повышение продуктивности сельскохозяйственных культур: Дис. ... д-ра с.-х. наук. Краснодар, 2015. 668 с.
2. *Завалин А.А., Соколов О.А., Шмырева Н.Я.* Азот в агросистеме на черноземных почвах (к 125-летию экспедиции В.В. Докучаева в Каменную степь). М.: ВНИИА, 2018. 180 с.
3. *Надеждина Е.В.* Эколого-агрохимические аспекты регулирования азотного режима черноземных почв лесостепи Среднего Поволжья: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Казань, 2004. 64 с.
4. *Кирюшин В.И.* Агрономическое почвоведение. М.: КолосС, 2010. 687 с.
5. *Кинчус Л., Поцене А., Поцюс С.* Миграция нитратов по почвенному профилю // Мелиорация. 2007. С. 140–146.
6. *Кирюшин В.И., Ткаченко Г.И.* О нисходящей миграции нитратов в черноземах Сибири при сельскохозяйственном использовании // Почвоведение. 1986. № 2. С. 34–43.
7. *Минеев В.Г.* Экологические проблемы агрохимии. М.: Изд-во МГУ, 1988. 286 с.
8. *Шеуджен А.Х., Онищенко Л.М., Осипов М.А., Есипелко С.В., Ковалев С.С.* Минеральные удобрения и урожайность сельскохозяйственных культур, выращиваемых на черноземе выщелоченном Прикубанской низменности / Сб. “Итоги выполнения программы фундаментальных исследований государственных академий на 2013–2020 гг.”. Мат-лы Всерос. коорд. совещ. научн. учреждений-участников Географической сети опытов с удобрениями 16–17 апреля 2018 г. М.: ВНИИА, 2018. 440 с. С. 391–400.
9. *Шарков И.Н., Колбин С.А., Самохвалова Л.М.* Проблема азота при использовании чернозема выщелоченного по интенсивной технологии в лесостепи Западной Сибири // Агрохимия. 2021. № 2. С. 3–10.
10. *Белоусова Е.Н., Белоусов А.А.* Агрочвоведение. Красноярск: Красноярск. ГАУ, 2016. 325 с.
11. Трансформация азота в почве [Электр. ресурс] / agpoint.com...v-pochve...transformaciya-azote-v... / (дата обращения 27.12.20210).
12. *Волынкин В.И., Волынкина О.В., Телегин В.А.* Влияние азотного удобрения в зернопропашном севообороте и при бессменном выращивании пшеницы на урожай сельскохозяйственных культур, качество зерна и плодородие почвы // Агрохимия. 2007. № 8. С. 23–27.
13. Методические рекомендации по оценке обеспеченности почв нитратным азотом и применению азотных удобрений в зоне обслуживания ФГБУ САС “Шадринская”. Шадринск, 2018. 20 с.

Migration of Nitrate Nitrogen by Soil Profile

O. V. Volynkina^{a, #}, A. N. Kopylov^a

^aUral Federal Agrarian Scientific Research Centre—Ural Branch of the RAS,
ul. Belinskogo 112a, Ekaterinburg 620142, Russia

[#]E-mail: volynkina.o@bk.ru

In the leached low-humus medium loamy chernozem of the central zone of the Kurgan region, losses of nitrate nitrogen through leaching with precipitation down the soil profile were noted. Losses increased with the use of increased doses of nitrogen fertilizers, as well as in variants with unilateral application of nitrogen fertilizers.

Keywords: leached low-humus medium loamy chernozem, migration of nitrate nitrogen along the soil profile, nitrogen balance, crop yield, crop rotation, permanent wheat after stubble.

УДК 631.417.2:631.445.41:631.82(470.4)

ДИНАМИКА ГУМУСНОГО СОСТОЯНИЯ ЧЕРНОЗЕМА ЮЖНОГО ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ПРИМЕНЕНИИ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ В УСЛОВИЯХ СТЕПНОГО ПОВОЛЖЬЯ

© 2024 г. Д. Ю. Журавлев^{1,*}, Т. М. Ярошенко¹,
Н. Ф. Климова¹, Л. Б. Сайфуллина¹

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

*E-mail: dmitry_zhuravlev80@mail.ru

Представлены результаты наблюдения за динамикой гумуса и общего азота чернозема южного в условиях длительного стационарного опыта с применением минеральных удобрений. В первые 3 ротации зернопаропропашного севооборота отмечена интенсивная минерализация гумуса во всех вариантах опыта. В условиях зернопарового севооборота этот процесс замедлился, а в варианте с применением минимальных доз азотно-фосфорных удобрений в 6-й ротации выявлено накопление гумусовых веществ. Максимальное снижение содержания гумуса по окончании 8-ми ротаций севооборота (более 48 лет) наблюдали в вариантах с внесением средних и высоких доз азотно-фосфорных удобрений. Применение минимальной дозы удобрений лучшим образом компенсировало потери гумуса чернозема южного при длительном сельскохозяйственном использовании. По сравнению с исходными данными в опыте отмечены негативные изменения качественного состава гумуса, выраженные в снижении доли гуминовых кислот. По окончании 8-й ротации содержание общего азота в почве во всех вариантах опыта уменьшилось.

Ключевые слова: гумус, общий азот, минеральные удобрения, длительный стационарный опыт, чернозем южный, степное Поволжье.

DOI: 10.31857/S0002188124040026, EDN: dmjbmh

ВВЕДЕНИЕ

Длительное использование сельскохозяйственных угодий, как правило, сопряжено с существенной антропогенной нагрузкой на пашню, способствующей значительным изменениям параметров почвенного плодородия. Одним из таких наиболее важных параметров является количественный и качественный состав гумуса почвы. Ухудшение гумусного состояния приводит к негативным изменениям не только агрохимических, но и физико-химических свойств почв [1]. Систематическое применение минеральных и органических удобрений может оказывать существенное и различное по характеру влияние на гумусное состояние почв [28]. Изучение параметров почвенного плодородия сельскохозяйственных угодий в условиях длительных стационарных опытов позволяет наблюдать за интенсивностью и направленностью изменений гумуса почв в динамике, строить прогнозы. Например, на основании анализа многолетних экспериментальных данных 19-ти стационарных полевых опытов Географической сети установлено, что системы удобрения дерново-подзолистых и каштановых почв не обеспечивают воспроизводство гумуса и требуют совершенствования, где основной упор будет

сделан на биологизацию земледелия [36]. Наблюдения за динамикой гумусного состояния черноземов Среднего Поволжья за период 1973–1993 гг. в условиях зернопаропропашного севооборота показали, что применение навоза в дозах 5–10 т/га и полного минерального удобрения не восполняло потери гумуса, но снижало их относительно контроля [4]. В условиях Ставропольского края на черноземе обыкновенном в длительном стационарном опыте применение минеральных удобрений в течение 41 года способствовало уменьшению минерализации гумуса в сравнении с контролем на 0.2–0.6% [5–10].

Цель работы — определить в динамике характер влияния длительного применения минеральных удобрений на гумусное состояние чернозема южного в условиях степного Поволжья.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Наблюдения за гумусным состоянием чернозема южного проводили в условиях длительного полевого стационарного опыта, занесенного в “Реестр аттестатов Геосети длительных опытов с удобрениями и другими агрохимическими средствами Российской

Федерации” под № 15 и имеющего следующее название: “Разработка зональных систем удобрения в интенсивных технологиях возделывания зерновых культур”. Закладка полевого опыта была проведена доктором сельскохозяйственных наук, профессором М.П. Чуб и ее сотрудниками в 1969–1971 гг. на плакорно-равнинном агроландшафте в экспериментальном хозяйстве ФАНЦ Юго-Востока (г. Саратов).

Характеристика опытного участка следующая: почва – чернозем южный среднегумусный среднесплодный тяжелосуглинистый среднесмытый. Содержание гумуса по данным агрохимического обследования, проведенного перед закладкой опыта (1969–1971 гг.), в слое 0–40 см почвы в среднем составляло 4.35, общего азота – 0.24, валового фосфора – 0.12, валового калия – 1.60%. Обеспеченность легкогидролизующим азотом по Тюрину–Кононовой составляла 67, подвижным фосфором по Мачигину – 10–12, обменным калием – 345 мг/кг.

Климатические условия района проведения опыта являются типичными для засушливой черноземной степи Поволжья. Коэффициент континентальности – 180–200 (средне- и сильноконтинентальный). Средний гидротермический коэффициент (ГТК) вегетационного периода по Селянинову – 0.81 [6, 9]. По многолетним данным (1912–1980 гг.), представленным агрометеорологической службой ФАНЦ Юго-Востока, температура воздуха составила: минимальная зарегистрированная – 37.0, среднегодовая – 5.3, максимальная зарегистрированная – 41.0°C. Годовое количество осадков в среднем по годам составило: минимальное – 245, среднее – 451, максимальное – 648 мм; минимальное их количество за вегетационный период – 46.2, среднее и максимальное – 135.8 и 221.5 мм соответственно.

Исследование в стационарном опыте проводят на 3-х полях площадью 1.5 га каждое, что обеспечивает повторяемость в пространстве и во времени для наиболее полного учета погодных-климатических особенностей засушливой степи Поволжья (в период 1969–1971 гг. каждое из 3-х полей по очереди входило в севооборот первым полем). Расположение вариантов в опыте – рендомизированное, размер делянок – 235–300 м², повторность трехкратная. Полученные

в опыте экспериментальные данные подвергали статистической обработке методом дисперсионного анализа [73]. Содержание гумуса в почве определяли по методу И.В. Тюрина, анализ его группового состава проводили по Кононовой–Бельчиковой, общий азот – по Кьельдалю [85].

После закладки длительного стационарного опыта в 1969 г. первые 24 года исследования вели в условиях 6-польного зернопаропропашного севооборота (4 ротации) со следующим чередованием культур: пар чистый–озимая пшеница–яровая мягкая пшеница–кукуруза на зеленую массу–ячмень–овес. В 5-й ротации севооборот из зернопаропропашного был преобразован в зернопаровой (кукуруза была заменена на просо) и приобрел следующий вид: пар чистый–озимая пшеница–яровая мягкая пшеница–просо–ячмень–овес. В настоящее время полностью окончена 8-я ротация севооборота. В работе представлены результаты 4-х наиболее контрастных вариантов опыта, существенно отличавшихся величиной доз примененных минеральных удобрений. Их можно разделить на варианты: 1 – контроль, без удобрений, 6 – минимальные дозы азотно-фосфорных удобрений, 8 – средние дозы азотно-фосфорных удобрений и 11а – высокие дозы азотно-фосфорных удобрений.

При применении минимальной дозы азотно-фосфорных удобрений (вариант 6) вносили P40 и N30–40 1–2 раза за ротацию 6-польного севооборота. Средняя доза азотно-фосфорных удобрений (вариант 8) предусматривала применение N30–60 практически под все культуры севооборота. Вариант 11а отличался ежегодным применением более высоких доз азотных удобрений (табл. 1).

В посевах всех культур севооборота, кроме озимой пшеницы, все виды удобрений вносили с осени под основную обработку. В посевах озимой пшеницы азотные удобрения применяли в виде позднеосенней подкормки, а фосфорные, как и для остальных культур, – под вспашку. Калийные удобрения использовали в опыте только на начальном его этапе. Обеспеченность почвы доступными формами калия для зерновых культур была достаточной, вследствие чего достоверных прибавок урожая зерна от дополнительного его внесения с удобрениями получено не было. Тем не менее, сохраняется учет

Таблица 1. Дозы применения удобрений в 8-й ротации зернопарового севооборота в условиях длительного стационарного опыта

Вариант, №	Дозы элементов питания	
	суммарные за 8 ротаций	средние в год
1	–	Контроль (без удобрений)
6	N710P600K360	N14.8P12.5K7.5
8	N1520P780K350	N31.6P16.2K7.3
11а	N2570P800K350	N53.5P16.6K7.3

ранее внесенного калия в системе удобрения севооборота. Часть полученных по данному направлению результатов исследования опубликованы в научной литературе ранее [6, 9,97].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наблюдения за гумусным состоянием чернозема южного в длительном стационарном опыте в динамике указывали на развитие трансформационных процессов, в первую очередь затрагивающих его количественную составляющую, как в вариантах опыта, так и в ротациях 6-польного севооборота. В контрольном варианте наиболее существенное снижение содержания гумуса в слое 0–40 см относительно исходного показателя (4.35%) наблюдали после первых 3-х ротаций севооборота (на 0.37%). Аналогичные изменения отмечены и в варианте 6, где применяли минимальные дозы азотно-фосфорных удобрений (табл. 2).

В дальнейшем в вариантах 1 и 6 наблюдали некоторую стабилизацию гумусного состояния до конца 7-й ротации севооборота (рост в контроле относительно показателей в 4-й ротации – 0.07%, в варианте 6 – уменьшение на 0.05%), что свидетельствовало об установлении определенного баланса между процессами минерализации и накопления гумусовых веществ. Это явление, видимо, было вызвано сменой зернопаропропашного севооборота на зернопаровой. В конце 6-й ротации отмечено повышение содержания гумуса в варианте 6 относительно предыдущей ротации на 0.24%. По итогам 8-й ротации произошло дальнейшее снижение содержания гумуса в данных вариантах. Однако в варианте 6 с применением минимальных доз удобрений снижение гумусированности почвы было наименьшим в опыте. В вариантах 8 и 11а, где применяли средние и высокие дозы азотно-фосфорных удобрений, наиболее значительное снижение содержания гумуса относительно исходного также наблюдали в первые 3 ротации севооборота.

При этом в варианте 8 снижение гумусированности почвы в ротациях севооборота хотя и было постепенным, но вместе с тем по окончании 8-й ротации достигло максимума в опыте. В варианте 11а отмечена кратковременная положительная динамика содержания гумуса в 4-й ротации, которая также сменилась на отрицательную в последующих ротациях севооборота. В целом в эксперименте выявлены некоторые компенсирующие свойства минимальных доз азотно-фосфорных удобрений на содержание гумуса относительно контрольного варианта. При этом повышение доз минеральных удобрений до средних и высоких способствовало усилению процессов минерализации органического вещества почвы.

Изучение качественного состава гумуса чернозема южного показало существенные его изменения по итогам 8-ми ротаций 6-польного севооборота с применением минеральных удобрений относительно исходного показателя на момент закладки опыта. Анализ полученных результатов указывал на уменьшение количества гуминовых кислот во всех вариантах опыта в 8-й ротации по сравнению с исходными данными (табл. 3).

При этом наименьшее их содержание отмечено в контроле и в варианте 11а, где применяли высокие дозы удобрений. В этих же вариантах наблюдали рост доли фульвокислот в групповом составе и, соответственно, более узкое соотношение ГК : ФК. Это обстоятельство свидетельствовало о развитии негативных почвенных процессов, связанных с ростом подвижности гумуса в данных вариантах опыта. Несколько лучшее состояние гумуса отмечено в вариантах 6 и 8, где уменьшение доли гуминовых кислот было менее выражено, а соотношение ГК : ФК было более широким. В данных вариантах опыта этому также способствовало снижение доли фульвокислот в групповом составе, что в лучшем случае влияло на качественный состав гумуса.

Таблица 2. Динамика содержания гумуса в слое 0–40 см почвы за 8 ротаций 6-польного севооборота, %

Вариант, №	Исходное (1969–1971 гг.)	Ротации							
		1-я (1974–1976 гг.)	2-я (1980–1982 гг.)	3-я (1986–1988 гг.)	4-я (1992–1994 гг.)	5-я (1998–2000 гг.)	6-я (2004–2006 гг.)	7-я (2010–2012 гг.)	8-я (2016–2018 гг.)
1	4.35	4.31	4.22	3.98	3.93	3.98	3.95	4.00	3.80
6		4.32	4.26	3.98	4.03	3.93	4.17	3.98	3.91
8		4.26	4.20	4.12	4.10	3.93	3.98	4.01	3.60
11а		4.34	4.19	3.86	4.07	3.88	3.84	3.86	3.69

$HCP_{05} = 0.22\%$

Таблица 3. Изменение качественного состава гумуса в черноземе южном (слой 0–40 см) при длительном применении минеральных удобрений

Вариант, №	% от общего гумуса		ГК: ФК
	ГК	ФК	
Исходное содержание (1969–1971 гг.)	32.2	11.2	2.8
8-я ротация (2016–2018 гг.)			
1	25.9	13.3	1.9
6	27.5	8.6	3.1
8	29.7	9.0	3.2
11а	26.0	11.2	2.3
<i>HCP</i> ₀₅ , %	2.0	–	–

Высокая обеспеченность растений доступным азотом удобрений в варианте 11а, стимулирующая их ростовые процессы, также способствовала повышению микробиологической активности почвы, связанной с минерализационными и гидролитическими процессами, затрагивающими органический азот гумусовых веществ. В определенной степени это и определяло сложившиеся негативные изменения группового состава гумуса в данном варианте опыта.

Отличительной особенностью в опыте также было и то, что наиболее существенное снижение

содержания гумуса относительно исходного на момент закладки опыта отмечено в условиях зернопаро-пропашного севооборота. Причиной этому, видимо, было повышение микробиологической активности, связанной с минерализацией органического вещества почвы при наличии в севообороте пропашного звена. В период 5–8-й ротаций в зернопаровом севообороте гумусное состояние чернозема южного стало более выровненным.

Известно, что гумусное состояние почв тесно связано с запасами общего азота, поскольку большая

Таблица 4. Динамика содержания общего азота в условиях длительного стационарного опыта с минеральными удобрениями

Вариант	<i>N</i> _{общ.} , %
1969–1971 гг. (исходное содержание)	0.24
5-я ротация (1998–2000 гг.)	
1. Контроль	0.22
6. N14.8P12.5K7.5	0.22
8. N31.7P16.3K7.3	0.23
11а. N53.5P16.7K7.3	0.21
6-я ротация (2004–2006 гг.)	
1. Контроль	0.21
6. N14.8P12.5K7.5	0.22
8. N31.7P16.3K7.3	0.21
11а. N53.5P16.7K7.3	0.21
7-я ротация (2010–2012 гг.)	
1. Контроль	0.21
6. N14.8P12.5K7.5	0.21
8. N31.7P16.3K7.3	0.21
11а. N53.5P16.7K7.3	0.21
8-я ротация (2016–2018 гг.)	
1. Контроль	0.20
6. N14.8P12.5K7.5	0.23
8. N31.7P16.3K7.3	0.20
11а. N53.5P16.7K7.3	0.21
<i>HCP</i> ₀₅ , %	0.01

часть столь важного для растений макроэлемента питания представлена органическими соединениями гумусовой природы [102]. Эта закономерность подтверждена наблюдениями за динамикой содержания общего азота чернозема южного в условиях стационарного опыта в течение 8-ми ротаций 6-польного севооборота, где отмечали ее схожий характер в сравнении с динамикой гумуса (табл. 4).

По итогам проведенных исследований было установлено, что в конце 5-й ротации севооборота содержание общего азота по сравнению с исходными данными в опыте снизилось, достигнув минимума в варианте 1а, где вносили высокие дозы азотно-фосфорных удобрений. Накопление в 6-й ротации гумусовых веществ в варианте 6 отразилось на содержании общего азота, которое было самым высоким относительно остальных вариантов опыта. В определенной степени это подтверждено высоким уровнем корреляционной связи между содержанием гумуса и общего азота в вариантах опыта в 6-й ротации севооборота ($r = 0.88$).

По итогам 7-й ротации обогащение почвы гумусом и содержание в ней общего азота в варианте 6 снизилось, а уровень корреляции между этими признаками в опыте повысился ($r = 0.95$). В конце 8-й ротации вариант 6 отличался наименьшими потерями общего азота, в то время как в вариантах с применением средних и высоких доз азотно-фосфорных удобрений (8 и 1а), они были на уровне контроля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, за 8 ротаций 6-польного севооборота гумусное состояние чернозема южного в длительном опыте с минеральными удобрениями негативно изменилось. Наиболее интенсивно минерализацию гумуса в вариантах опыта наблюдали в первые 3 ротации зернопаропропашного севооборота. В условиях зернопарового севооборота этот процесс замедлился, а в варианте 6, где применяли минимальные дозы азотно-фосфорных удобрений, в период 6-й ротации отмечено накопление гумусовых веществ. В целом в опыте максимальное снижение содержания гумуса по окончании 8-й ротации севооборота наблюдали в вариантах 8 и 1а, где вносили средние и высокие дозы азотно-фосфорных удобрений. Применение минимальной дозы в варианте 6 лучшим образом компенсировало потери гумуса чернозема южного в опыте при его длительном сельскохозяйственном использовании.

Анализ качественного состава гумуса в конце 8-й ротации севооборота показал наличие негативных изменений, выраженных в снижении доли гуминовых кислот. При этом в контроле эти изменения достигли максимума и к тому же сопровождались наиболее существенным уменьшением отношения ГК : ФК.

Средние и высокие дозы азотно-фосфорных удобрений, примененные в этих вариантах опыта, способствовали высокой микробиологической активности, связанной с минерализацией органического вещества. Поскольку большая часть общего азота почвы связана с органическим веществом, то вполне закономерным было наблюдать его снижение в опыте к концу 8-й ротации севооборота. При этом, как и в случае с гумусом, наименьшие его потери были отмечены в варианте 6, где систематически применяли минимальные дозы азотно-фосфорных удобрений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Богуславская Н.В.* Севооборот и органическое вещество почвы // Экол. безопасность в АПК. Реферат. журн. 2008. № 3. С. 648.
2. *Туев Н.А.* Микробиологические процессы гумусообразования. М.: Агропромиздат, 1989. 239 с.
3. *Сычев В.Г., Шевцова Л.К., Мерзлая Г.Е.* Исследование динамики и баланса гумуса при длительном применении систем удобрения на основных типах почв // Агрохимия. 2018. № 2. С. 3–21. <https://doi.org/10.7868/S0002188118020011>
4. *Климова Е.В.* Динамика гумуса и баланс элементов питания при длительном применении удобрений на черноземах Среднего Заволжья в зернопаропропашном севообороте // Экол. безопасность в АПК. Реферат. журн. 2000. № 4. С. 792.
5. *Шаповалова Н.Н.* Динамика показателей плодородия и продуктивность чернозема обыкновенного в последствии длительного применения минеральных удобрений в условиях Центрального Предкавказья // Изв. Оренбург. ГАУ. 2019. № 3(77). С. 8–12.
6. *Чуб М.П., Пронько В.В., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф., Журавлев Д.Ю., Сычев В.Г., Романенков В.А., Беличенко М.В.* Эффективность длительного применения удобрений в агроценозах степной зоны Саратовского Поволжья в условиях аридного климата // Бюл. Геосети ВНИИА. Вып. 15. М., 2014. 56 с.
7. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта. 5-е изд., доп. и перераб. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
8. Практикум по почвоведению / Под ред. И.С. Кауричева. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1986. 336 с.
9. *Сычев В.Г., Лошаков В.Г., Романенков В.А., Беличенко М.В., Чуб М.П., Пронько В.В., Ярошенко Т.М., Климова Н.Ф., Журавлев Д.Ю.* Плодородие черноземов засушливого Поволжья и продуктивность полевых культур при длительном применении минеральных удобрений // Бюл. Геосети ВНИИА. Вып. 26. М., 2017. 48 с.
10. *Возбуцкая А.Е.* Химия почвы / Под ред. Д.Л. Аскинази. 3-е изд., испр. и доп. М.: Высш. шк., 1968. 428 с.

Dynamics of the Humus State of Southern Chernozem with Prolonged Use of Mineral Fertilizers in the Conditions of the Steppe Volga Region

D. Y. Zhuravlev^{a,#}, T. M. Yaroshenko^a, N. F. Klimova^a, L. B. Saifullina^a

^a*Federal Agrarian Scientific Center of the South-East,
ul. Tulaykova 7, Saratov 410010, Russia*

[#]*E-mail: dmitry_zhuravlev80@mail.ru*

The results of monitoring the dynamics of humus and total nitrogen of the southern chernozem in a long-term stationary experiment with the use of mineral fertilizers are presented. In the first 3 rotations of the grain-to-crop rotation, intensive mineralization of humus was noted in all variants of the experiment. In the conditions of grain-steam crop rotation, this process slowed down, and in the variant with the use of minimum doses of nitrogen-phosphorus fertilizers in the 6th rotation, the accumulation of humic substances was revealed. The maximum decrease in humus content at the end of 8 rotations of crop rotation (more than 48 years) was observed in variants with the introduction of medium and high doses of nitrogen-phosphorus fertilizers. The use of a minimum dose of fertilizers best compensated for the loss of humus of the southern chernozem during prolonged agricultural use. In comparison with the initial data, negative changes in the qualitative composition of humus were noted in the experiment, expressed in a decrease in the proportion of humic acids. At the end of the 8th rotation, the total nitrogen content in the soil decreased in all variants of the experiment.

Keywords: humus, total nitrogen, mineral fertilizers, long-term stationary experience, southern chernozem, steppe Volga region.

УДК 631.8:631.45:631.445.2

ВЛИЯНИЕ МНОГОЛЕТНЕГО ПРИМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ И НАВОЗА НА АГРОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕРОЙ ЛЕСНОЙ ПОЧВЫ, ПРОДУКТИВНОСТЬ КУЛЬТУР И СЕКВЕСТРАЦИЮ УГЛЕРОДА[§]

© 2024 г. Н. Б. Зинякова¹, Д. А. Соколов¹, Т. Н. Лебедева¹,
С. Н. Удальцов¹, В. М. Семенов^{1, 2, *}

¹Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН –
обособленное подразделение ФИЦ ПНЦБИ РАН
142290 Пушкино Московской обл., Институтская ул., 2, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии
143050 Московской обл., Одинцовский р-н, р.п. Большие Вяземы ул. Институт, влад. 5, Россия

*E-mail: v.m.semenov@mail.ru

В микрополевом опыте изучено влияние длительного применения возрастающих доз минеральных (от N90P75K100 до N360P300K400) и органических (навоз крупного рогатого скота от 25 до 100 т/га) удобрений на плодородие серой лесной почвы. За 9 лет было внесено: азота – 0.81–3.24, P₂O₅–0.68–2.70 и K₂O – 0.90–3.60 т/га. С навозом в почву поступило: сухой массы – 43–173, C_{орг} – 16–65, азота – 0.85–3.41, P₂O₅–0.65–2.59 и K₂O – 0.86–3.46 т/га. По величине урожайности минеральная система удобрения превосходила органическую в среднем на 29%. При экстремальных дозах (N360P300K400 и навоз КРС 100 т/га) минеральные удобрения в отличие от органических удобрений сильнее угнетали продуктивность культур. Установлена прямая линейная зависимость между дозой минеральных и органических удобрений и увеличением содержания подвижных P₂O₅ и K₂O в почве. Внесение экстремальных доз удобрений не вело к насыщению почвы подвижными формами фосфора и калия. Многолетнее внесение органических удобрений повышало рН_{KCl} почвы на 0.4–1.3 ед., минеральных удобрений – снижало на 0.8–1.4 ед. рН. Ежегодное применение минеральных удобрений способствовало увеличению содержания C_{орг} в почве на 0.02–0.04% в год, органических удобрений – на 0.08–0.17% в год. Внесение навоза по 100 т/га на протяжении 9-ти лет вело к насыщению почвы органическим углеродом. В почве с минеральной системой удобрения наблюдали уменьшение соотношения C : N, а при органической системе это соотношение расширилось. Предложен способ расчета эффективности секвестрации углерода при оценке разных агроприемов. Показано, что эффективность секвестрации углерода при применении органической системы удобрения была на 15% больше, чем минеральной системы.

Ключевые слова: органический углерод, общий азот, подвижный фосфор, подвижный калий, рН почвы, переудобренность почвы.

DOI: 10.31857/S0002188124040033, **EDN:** dmhymz

ВВЕДЕНИЕ

В Нечерноземной зоне России сосредоточена 1/5 часть пахотных земель, из которых около 23% представлено серыми лесными почвами [1].

[§] Работа выполнена в рамках Госзадания “Комплексное исследование влияния природных и антропогенных факторов на состояние почвенных предшественников, источников и стоков парниковых газов, включая моделирование структурно-функциональной организации биогенных циклов и факторов разномасштабной динамики наземных экосистем в условиях изменяющейся среды”, регистрационный номер 122040500037-6.

Физико-химические и агрохимические свойства серых лесных почв зависят от ландшафтно-географических условий залегания, длительности эволюции, истории и характера землепользования [2, 3]. Окультуривание серых лесных почв способствует улучшению показателей почвенного плодородия и получению стабильно высоких урожаев сельскохозяйственных культур [4, 5]. По результатам полевых опытов Агрохимслужбы, получена достоверная корреляционная связь продуктивности культур со степенью окультуренности почв, при этом долевое участие минеральных удобрений,

степени окультуренности и погодных условий в приросте урожая в лесостепной зоне распространения серых лесных почв составляет 23, 36 и 41% соответственно [6]. Повышение уровня потребления культурами азота, фосфора и калия путем сбалансированного внесения удобрений позволяет увеличить адаптационный потенциал растений к неблагоприятным погодным условиям и уменьшить отрицательное влияние этих факторов на формирование урожая [7, 8].

Повышение плодородия почв, достигнутое за счет интенсивной химизации земледелия в 1960–1980 гг., позволило смягчить негативные последствия резкого сокращения объемов применения минеральных и органических удобрений на рубеже веков. Однако систематическая недоудобренность культур в эти годы повлекла за собой повсеместную питательную деградацию пахотных почв, произошло снижение содержания подвижных форм фосфора и калия в почвах, баланс элементов минерального питания в земледелии стал выражено отрицательным [1, 6, 9–11]. При наметившейся в последние годы позитивной тенденции с обеспечением сельскохозяйственных организаций удобрениями и мелиорантами фактические объемы их применения остаются по-прежнему недостаточными для воспроизводства почвенного плодородия [12]. Российское сельское хозяйство нуждается в таких объемах применения минеральных и органических удобрений, которыми можно было бы не только компенсировать текущий вынос питательных элементов урожаем культур и утраченные ранее запасы макро- и микроэлементов, но и создать резерв элементов питания в почве. Комплексная рехимизация земледелия в сочетании с биологизацией и экологизацией агротехнологий призвана повысить продукционный потенциал пахотных почв, увеличить запасы органического углерода и минеральных элементов в почвах, синхронизировать питательный режим почвы с онтогенезом растений, оздоровить почвы и агроценозы [13–16].

Хотя минеральная система удобрения обеспечивает, как правило, более высокий урожай культур по сравнению с органической системой [17–20], органические источники элементов питания считаются более предпочтительным удобрением для большинства агроэкосистем, а отрицательные эффекты при применении органической системы удобрения менее выражены, чем минеральной системы [20–23]. Внесение навоза, компостов и растительных остатков способствует рекарбонизации и улучшению структуры почвы, пролонгированному обогащению почвы органическим веществом и биофильными элементами, увеличению таксономического разнообразия микробного сообщества и биологической активности почвы, сбалансированию минерализации–иммобилизации азота

и фосфора [24–29]. Накопление новых экспериментальных фактов и мета-анализы разных вопросов применения минеральных и органических удобрений являются приоритетными направлениями современных агрохимических исследований.

Определение оптимальных для конкретных культур и почвенно-экологических условий доз удобрений продолжает оставаться актуальной задачей агрохимии. Известно, что действие разных доз удобрений соответствует зонам кинетического (ростового), физиологического и метаболического отклика продуктивности культур [30]. Кинетический отклик свойственен при низких и умеренных дозах и проявляется в виде значительного усиления ростовых процессов с линейным увеличением урожая. Для растений, растущих на фоне высоких доз удобрений, характерен физиологический тип отклика, при котором изменение внутренних процессов обеспечивает формирование максимального урожая, хотя прибавка от удобрений не столь значительна, как в кинетической зоне. Метаболическая зона действия присуща экстремально высоким дозам удобрений, вызывающим депрессию ростовых процессов и нарушение обмена веществ, что ведет к снижению продуктивности культур. Для одних культур и типов почв дозы минеральных и органических удобрений могут быть оптимальными, а для других видов и условий – будут избыточными, приводя к снижению урожайности сельскохозяйственных растений и формированию избытка биофильных элементов в почве [31, 32]. Хотя удобрения в высоких дозах агрономически и физиологически менее эффективны, чем в низких и умеренных [33, 34], потребность в максимизации урожая сельскохозяйственных культур, в том числе с целью секвестрации атмосферного CO₂, зачастую решается применением высоких и даже экстремально высоких доз минеральных удобрений [35, 36]. Нередки случаи внесения высоких доз навоза с целью увеличения потенциального плодородия почвы, депонирования углерода или утилизации животноводческих остатков [37–39]. Таким образом, в краткосрочных и длительных опытах следует ориентироваться не только на определение оптимальных доз удобрений, но и устанавливать их критические (пороговые) количества, применение которых ведет к снижению урожая.

Цель работы – изучение влияния длительного внесения умеренных, высоких и экстремально высоких доз минеральных и органических удобрений на агрохимические свойства серой лесной почвы и продуктивность 5-польного севооборота, а также проверить возникновение переудобренности почвы при систематическом применении минеральной и органической систем удобрения.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в микрополевом опыте на протяжении 9-ти лет (с 2011 по 2019 гг.) на серой лесной почве (Московская обл., Серпуховский р-н). Согласно данным многолетних метеонаблюдений, проводимых на Станции комплексного фоновоего мониторинга, расположенной на территории Приокско-Террасного биосферного заповедника (Данки, Серпуховской р-н, Московская обл.), среднегодовая температура воздуха в 1973–2018 гг. в районе исследования составила $5.2 \pm 0.3^\circ\text{C}$, среднегодовое количество осадков – 667 ± 34 мм. Гидротермический коэффициент Селянинова за летний период (июнь–август) варьировал от 0.70 до 2.40, при среднем многолетнем 1.49 ± 0.14 [40]. Для серых лесных почв района исследования характерны среднесуглинистый гранулометрический состав, низкое содержание органического вещества и элементов питания, низкая емкость катионного обмена, кислая реакция среды, высокая водоудерживающая и водоподъемная способность [41].

В 2000 г. в сетчатом павильоне на территории Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН были установлены пластиковые емкости без дна (микроделянки) площадью 0.25 м^2 ($0.5 \times 0.5 \times 0.3$ м) и заполнены серой лесной почвой пахотного неудобренного массива. С 2000 по 2004 г. на микроделянках выращивали кукурузу и овес, используя дозы минеральных удобрений не больше N120P120K120. В 2005 г. был произведен уравнильный посев рапса, и почва была переведена в залежь. Ежегодно естественную растительность, растущую в микроделянках, скашивали и удаляли с поверхности почвы. В мае 2011 г. почва была перекопана на глубину 0–20 см, частично изъята из коробов, смешана и в случайном порядке засыпана вновь. Агрохимическая характеристика

почвы на момент закладки опыта была следующей: pH_{KCl} 4.96, H_r (мг-экв/100 г) – 3.98, $\text{C}_{\text{орг}}$ и $\text{N}_{\text{общ}}$ (%) – 0.97 и 0.095 соответственно, $\text{N}_{\text{мин}}$, P_2O_5 и K_2O (мг/кг) – 19.8, 88.2 и 73.3 соответственно, сумма обменных оснований – 11.9 мг-экв/100 г, степень насыщенности почв основаниями – 75%, содержание физической глины – 32% [42].

В опыте создавали модели минеральной (традиционной) и органической системы удобрения. Схема включала варианты: 1 – без удобрений (контроль), 2 – N90P75K100, 3 – N180P150K200, 4 – N270P225K300, 5 – N360P300K400, 6 – навоз в дозе 25 т/га, 7 – навоз 50 т/га, 8 – навоз 75 т/га, 9 – навоз 100 т/га, 10 – чистый пар. В качестве удобрений использовали карбамид, суперфосфат двойной, сернокислый калий, свежий навоз крупного рогатого скота (КРС). Содержание сухого вещества и биофильных элементов в навозе КРС приведено в табл. 1.

Количества поступающего с навозом КРС азота, фосфора и калия были приблизительно равны дозам минеральных удобрений (табл. 2).

Минеральные и органические удобрения внесли ежегодно весной, разбрасывая по поверхности почвы с последующей заделкой в слой 0–20 см. Дозы внесенных в почву минеральных и органических удобрений были условно отнесены к умеренным (варианты 2 и 6), высоким (варианты 3, 4 и 7, 8) и экстремально высоким (варианты 5 и 9). За 9 лет микрополевого опыта было проведено 2 неполные ротации 5-польного севооборота со следующей очередностью культур: сахарная свекла сорта Анастасия–кукуруза на зеленую массу, гибрид Молдавский–лук репчатый сорта Центурион–картофель сорта Жуковский–картофель сорта Жуковский. Исследованные культуры кроме лука устойчивы к высоким и экстремально

Таблица 1. Содержание углерода и азота в свежем навозе крупного рогатого скота, примененного в длительном микрополевом опыте

Год	Сухое вещество, %	$\text{C}_{\text{орг}}$	$\text{N}_{\text{общ}}$	C : N
		% на сухую массу		
1	20.4 ± 0.9	36.4 ± 1.5	1.92 ± 0.14	19.0
2	19.8 ± 2.1	37.8 ± 1.3	1.99 ± 0.06	19.0
3	20.6 ± 0.5	38.7 ± 1.3	2.02 ± 0.04	19.2
4	19.1 ± 1.5	36.8 ± 2.9	2.00 ± 0.04	18.4
5	18.8 ± 0.6	36.6 ± 2.1	1.96 ± 0.10	18.7
6	18.5 ± 1.4	40.7 ± 0.9	1.99 ± 0.11	20.5
7	19.3 ± 0.4	35.4 ± 0.5	1.97 ± 0.02	18.0
8	17.9 ± 0.0	34.8 ± 0.4	1.98 ± 0.05	17.6
9	19.5 ± 2.1	38.3 ± 1.6	1.91 ± 0.09	20.1

Примечание. Содержание P_2O_5 и K_2O в среднем 1.50 и 2.00% от сухой массы соответственно.

Таблица 2. Ежегодное (графа 1) и общее (графа 2) количество минеральных и органических удобрений, примененных в 9-летнем микрополевым опыте на серой почве, т/га

Вариант	Масса минеральных удобрений и сухого вещества навоза		Углерод		Азот (N)		Фосфор (P ₂ O ₅)		Калий (K ₂ O)		Всего NPK	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1. Без удобрений	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2. N90P75K100	0.57	5.1	0	0	0.09	0.81	0.08	0.68	0.10	0.90	0.27	2.39
3. N180P150K200	1.14	10.2	0	0	0.18	1.62	0.15	1.35	0.20	1.80	0.53	4.77
4. N270P225K300	1.71	15.3	0	0	0.27	2.43	0.23	2.03	0.30	2.70	0.80	7.16
5. N360P300K400	2.28	20.5	0	0	0.36	3.24	0.30	2.70	0.40	3.60	1.06	9.54
6. Навоз 25 т/га	4.8	43.2	1.79	16.1	0.09	0.85	0.07	0.65	0.10	0.86	0.26	2.36
7. Навоз 50 т/га	9.6	86.4	3.58	32.2	0.19	1.70	0.14	1.30	0.19	1.73	0.52	4.73
8. Навоз 75 т/га	14.4	130	5.37	48.3	0.28	2.56	0.22	1.94	0.29	2.59	0.79	7.09
9. Навоз 100 т/га	19.2	173	7.16	64.5	0.38	3.41	0.29	2.59	0.38	3.46	1.05	9.46
10. Чистый пар	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

высоким дозам удобрений. После всходов в каждом коробе оставляли 2 растения сахарной свеклы и картофеля, 6 растений кукурузы и лука, что обеспечивало нормальную площадь питания. Остатки корней перемешивали с почвой, а основную и побочную продукцию удаляли. Почву чистого пара в течение вегетационного периода дважды перекапывали, сорные растения удаляли. Уборку урожая проводили в сентябре, учитывая урожай основной продукции (корнеплоды сахарной свеклы, зеленая масса кукурузы, луковицы лука и клубни картофеля). Повторность опыта трехкратная.

Образцы почвы отбирали тростевым буром после уборки урожая из каждой повторности согласно схеме опыта. Отобранные образцы смешивали и высушивали на открытом воздухе с удалением видимых остатков растений и мезофауны, просеивая через сито с диаметром отверстий 2 мм. В образцах почвы, растертых до частиц <1 мм, определяли величину рН_{KCl} потенциометрическим методом (Sartorius Basic Meter PB-11), содержание подвижных форм фосфора (P₂O₅) по Кирсанову в вытяжке 0.2 н. HCl спектрофотометрическим методом (UNICO-1200) и калия (K₂O) по Кирсанову в вытяжке 0.2 н. HCl методом пламенной фотометрии (BWB-XP Performance Plus). Содержание общего (органического) углерода и общего азота определяли с помощью CNHS-анализатора (Leco 932) сухим сжиганием. Экспериментальные данные приведены в виде средних величин из 3-х аналитических повторений и их стандартных отклонений.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Урожай культур. В условиях микрополевого опыта устраняется почвенная неоднородность, четче реализуется основной действующий фактор при сохранении совокупности естественных почвенных процессов и агроклиматических факторов, создается практически идеальное распределение гранул минеральных удобрений и частиц навоза по поверхности почвы, их равномерное смешивание с пахотным слоем. В итоге полностью реализуется производственный потенциал культур. Урожай возделываемых культур на протяжении 9 лет микрополевого опыта был сопоставим с таковым, полученным для опытных культур в крупноделяночных опытах или в производственных условиях (табл. 3).

Считается, что минеральная система увеличивает актуальное плодородие почв, превосходя органическую по агрономической и экономической эффективности, тогда как органическая система удобрения положительно сказывается на потенциальном плодородии [1, 6, 11, 43–46]. Применение минеральных и органических удобрений в нашем опыте на серой лесной почве повышало урожай культур по сравнению с неудобренным контролем в среднем за 2 ротации севооборота соответственно на 207 и 142%, при этом прибавка урожая культур увеличивалась в ряду: лук репчатый < картофель < сахарная свекла < кукуруза. Величина урожая культур при применении возрастающих доз минеральных удобрений в среднем за 9 лет опыта была на 29% (от –1 до +87%) больше, чем от органических удобрений. Известно, что при органическом земледелии урожай культур меньше, чем при

Таблица 3. Урожай культур при систематическом внесении возрастающих доз минеральных и органических удобрений в течение 9 лет

Вариант	1-я ротация					2-я ротация				
	сахарная свекла (корнеплоды)	кукуруза (зеленая масса)	лук репчатый	картофель (клубни)	картофель (клубни)	сахарная свекла (корнеплоды)	кукуруза (зеленая масса)	лук репчатый	картофель (клубни)	картофель (клубни)
Без удобрений	3.18 ± 0.24 —	1.64 ± 0.14 —	0.65 ± 0.06 —	1.27 ± 0.18 —	0.71 ± 0.20 —	0.70 ± 0.06 —	1.26 ± 0.13 Нет	0.27 ± 0.05 Нет	0.98 ± 0.10 Нет	
N90P75K100	4.42 ± 0.22 39	3.73 ± 0.19 127	1.01 ± 0.13 56	2.93 ± 0.06 131	1.58 ± 0.51 122	2.09 ± 0.14 196	4.13 ± 0.33 227	0.47 ± 0.01 74	1.31 ± 0.12 34	
N180P150K200	5.85 ± 0.27 84	6.68 ± 0.21 307	1.23 ± 0.07 90	3.89 ± 0.40 207	2.52 ± 0.19 254	3.32 ± 0.18 371	8.40 ± 0.56 565	0.63 ± 0.03 132	2.59 ± 0.17 166	
N270P225K300	6.62 ± 0.40 108	7.88 ± 0.41 380	0.79 ± 0.08 23	3.77 ± 0.20 197	3.28 ± 0.20 361	2.61 ± 0.28 270	8.96 ± 0.44 609	0.69 ± 0.02 155	3.19 ± 0.06 226	
N360P300K400	6.25 ± 0.16 97	7.15 ± 0.62 336	0.65 ± 0.14 0	3.61 ± 0.26 185	2.54 ± 0.36 257	1.66 ± 0.08 135	10.1 ± 0.76 699	0.40 ± 0.08 49	2.11 ± 0.21 116	
Навоз 25 т/га	4.03 ± 0.50 27	3.05 ± 0.23 86	0.85 ± 0.03 31	1.57 ± 0.02 24	1.25 ± 0.11 75	1.45 ± 0.13 106	4.56 ± 0.63 261	0.34 ± 0.03 25	1.45 ± 0.12 48	
Навоз 50 т/га	5.21 ± 0.60 64	4.17 ± 0.23 154	1.18 ± 0.10 82	2.71 ± 0.42 114	1.35 ± 0.23 90	2.58 ± 0.18 267	6.69 ± 0.94 429	0.60 ± 0.02 124	1.91 ± 0.12 96	
Навоз 75 т/га	5.71 ± 0.30 80	5.16 ± 0.04 215	0.82 ± 0.05 27	2.08 ± 0.10 64	1.76 ± 0.35 148	3.71 ± 0.27 427	7.51 ± 0.07 494	0.58 ± 0.09 117	2.09 ± 0.15 114	
Навоз 100 т/га	6.21 ± 0.65 95	5.56 ± 0.21 239	0.78 ± 0.16 21	2.00 ± 0.21 58	0.94 ± 0.11 33	2.05 ± 0.12 191	7.39 ± 0.04 484	0.41 ± 0.06 53	2.44 ± 0.08 150	
$НСР_{05}$, кг/м ²	0.70	0.51	0.13	0.38	0.37	0.30	0.87	0.07	0.19	

Примечание. Над чертой — кг/м², под чертой — прибавка к контролю без удобрений, %.

традиционном земледелии с применением минеральных удобрений на 20% [17] и на 5–58% [19]. В сравнимых условиях полевых опытов урожай при применении НРК был больше по сравнению с внесением навоза на 25% на черноземах, на серых лесных и дерново-подзолистых почвах – на 12–17% [18], в других регионах – на 4–8% [20]. Во 2-й ротации величина урожая культур была меньше, чем в 1-й ротации (рис. 1).

Особенно сильное снижение урожая по сравнению с 1-й ротацией произошло в неудобренном контроле и в вариантах с возрастающими дозами минеральных удобрений (соответственно на 46 и 19–44%) и в меньшей мере – при применении органических удобрений (на 4–21%). Как следствие, если в 1-й ротации дополнительная прибавка урожая при применении минеральной системы по сравнению с органической составляла 42%, то во 2-й ротации – 13%, при этом урожай сахарной свеклы при внесении навоза оказался даже больше.

Размеры прибавки урожая культур от возрастающих доз минеральных и органических удобрений подчинялись полиномиальной зависимости (рис. 2).

При минеральной системе удобрения наибольший урожай корнеплодов сахарной свеклы и луковиц лука формировался при применении N180P150K200, клубней картофеля – при дозе N270P225K300, зеленой массы кукурузы – при экстремально высокой дозе N360P300K400. Однако каждая более высокая доза минеральных удобрений являлась, как правило, менее эффективной, чем предыдущая, а величины прибавки от экстремально высоких доз были не стабильными в течение 2-х ротаций, действуя в метаболической зоне отклика растений на удобрения. Поэтому при возделывании лука на серой лесной почве с низким исходным уровнем плодородия физиологически оптимальным является применение минеральных удобрений в интервале доз от N90P75K100 до N180P150K200, сахарной свеклы и картофеля – от N180P150K200 до N270P225K300, кукурузы на зеленую массу – от N270P225K300 до N360P300K300. В целом, для возделываемых видов овощных, технических и кормовых культур экстремально высокие дозы минеральных удобрений на уровне N360P300K400 были избыточными, не дававшими соответствующего прироста урожая или вовсе подавлявшими рост и развитие растений.

В вариантах с навозом КРС самая высокая прибавка урожая была получена для биомассы кукурузы при экстремальной дозе 100 т/га, эквивалентной N360P300K400 минеральных удобрений (табл. 3). При этом прибавка при применении навоза КРС 100 т/га лишь немногим превышала таковую от дозы 75 т/га (362 и 354% соответственно).

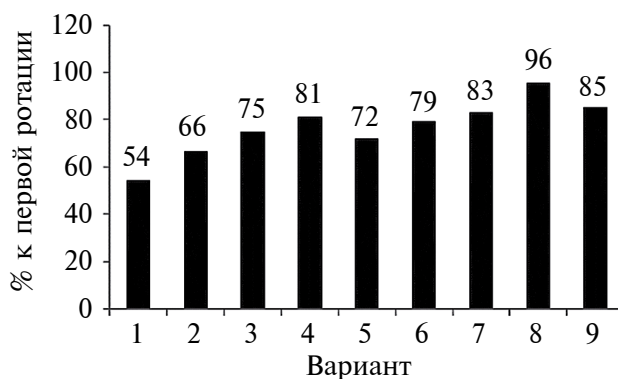


Рис. 1. Изменение урожая культур во 2-й ротации севооборота в зависимости от применения минеральных и органических удобрений (в среднем для сахарной свеклы, кукурузы, лука и картофеля). Варианты: 1 – без удобрений (контроль), 2 – N90P75K100, 3 – N180P150K200, 4 – N270P225K300, 5 – N360P300K400, 6 – навоз 25 т/га, 7 – навоз 50 т/га, 8 – навоз 75 т/га, 9 – навоз 100 т/га. Нумерация вариантов та же в табл. 2–5 и на рис. 1–5.

Урожай корнеплодов сахарной свеклы и клубней картофеля возрастал только до дозы навоза 75 т/га, лука – до дозы навоза 50 т/га. Ежегодное внесение навоза КРС 100 т/га не давало дополнительной прибавки урожая сахарной свеклы, картофеля и лука. В других исследованиях внесение 4–5-кратных доз навоза неблагоприятно сказывалось на росте растений и приводило к снижению урожая [44].

Таким образом, сахарная свекла, кукуруза, картофель и в меньшей мере лук репчатый были достаточно восприимчивы к систематическому внесению высоких доз минеральных (N180P150K200 до N270P225K300) и органических (50–75 т/га) удобрений, но хуже переносили экстремально высокие дозы (N360P300K400 и навоз КРС 100 т/га). Снижение прибавки урожая при внесении экстремально высоких доз по сравнению с высокими дозами может быть вызвано несколькими причинами. Во-первых, избыточное потребление элементов минерального питания нарушает внутреннюю сбалансированность физиолого-биохимических и продукционных процессов вегетирующих растений. Во-вторых, высокие концентрации солей подавляют поглотительную и синтетическую деятельность корневых систем. В-третьих, высокие дозы удобрений изменяют физико-химические свойства почвы, делая их некомфортными для произрастания растений. В-четвертых, внесение высоких доз удобрений создает повышенный уровень фитотоксичности почвы и снижает устойчивость растений к болезням и вредителям. Хотя органические удобрения элиминируют микробный фитотоксикоз минеральных удобрений [47, 48], поступление большого количества органического вещества

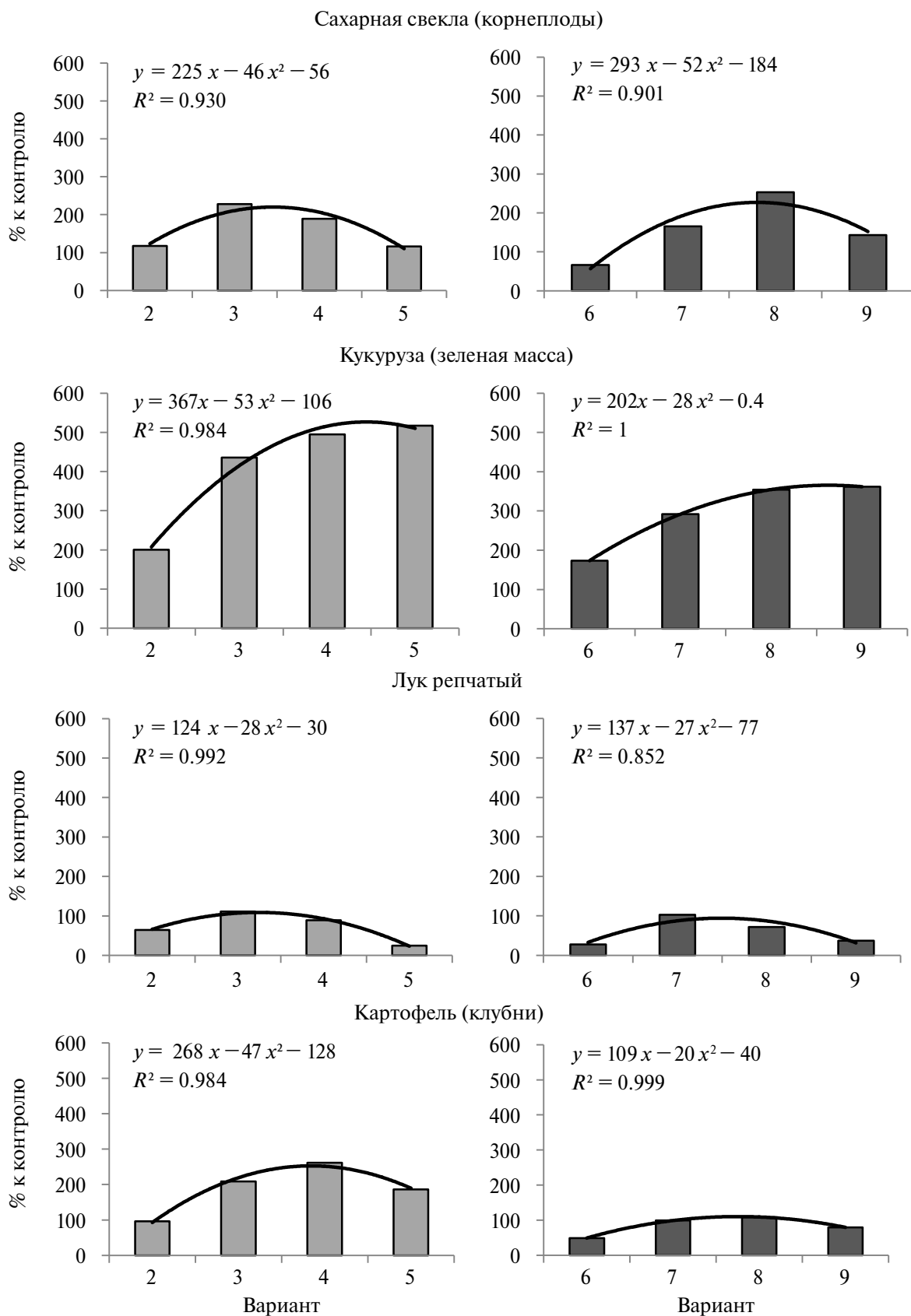


Рис. 2. Прибавка урожая культур в зависимости от доз минеральных и органических удобрений (среднее за 2 ротации севооборота).

с экстремально высокими дозами свежего навоза может быть причиной накопления в почве фитотоксичных веществ [49].

Обменная и гидролитическая кислотность серой лесной почвы. Большинство сельскохозяйственных растений очень требовательны к кислотности почвы. Кислая среда почвенного раствора – главная причина угнетения деятельности почвенных организмов, снижения биологической активности почвы, низких урожаев сельскохозяйственных культур, недостаточной эффективности минеральных удобрений, массовой гибели многолетних трав при перезимовке, низкого содержания белка в зерне и кормах [50]. Обобщение большого массива данных в производственных условиях на дерново-подзолистых и серых лесных почвах показало наличие достоверной корреляции ($r = 0.45–0.50$) величин урожая культур с рН почв [6]. Систематическое применение минеральных удобрений – одна из главных причин ацидификация сельскохозяйственных почв.

Серую лесную почву по степени кислотности перед началом опыта классифицировали как кислую. За 9 лет систематического применения минеральных удобрений произошло отчетливое уменьшение величины рН почвы на 0.8–1.4 ед. вплоть до 3.59 в варианте N360P300K400. Внесение свежего навоза КРС способствовало, наоборот, увеличению рН на 0.4–1.3 ед. до 6.35 при дозе 100 т/га (рис. 3).

В вариантах без удобрений и чистого пара величины рН почвы флуктуировали в пределах стандартного отклонения. Чем продолжительнее применяли минеральные удобрения, тем существеннее снижался рН ($r = -0.627, p < 0.001$), в случае применения навоза, наоборот, повышался ($r = 0.518, p = 0.001$). В вариантах с минеральными удобрениями величина рН почвы отрицательно коррелировала с ежегодными дозами NPK ($r = -0.771, p < 0.001$) и с суммарным их количеством за все годы внесения ($r = -0.911, p < 0.001$), а при внесении органических удобрений – соответственно положительно ($r = 0.801, p < 0.001$ и $r = 0.905, p < 0.001$).

В течение 9-ти лет применения возрастающих доз минеральных удобрений произошло увеличение гидролитической кислотности серой лесной почвы на 1.30–6.26 мг-экв/100 г (рис. 3). Противоположную динамику отметили при ежегодном внесении навоза КРС, применение которого в возрастающих дозах способствовало снижению гидролитической кислотности на 0.4–1.2 мг-экв/100 г. Величины гидролитической кислотности серой лесной почвы положительно коррелировали с ежегодным ($r = 0.818, p < 0.001$) и суммарным ($r = 0.880, p < 0.001$) количеством внесенных минеральных удобрений. Корреляционная связь показателей гидролитической кислотности почвы

с ежегодными дозами ($r = -0.811, p < 0.001$) и суммарным внесением навоза ($r = -0.869, p < 0.001$) была отрицательной. Судя по коэффициентам корреляции, влияние длительности внесения минеральных удобрений ($r = 0.627, p < 0.001$) было хотя и достоверным, но менее значимым, чем внесенных доз, а фактор продолжительности внесения навоза – не значимым ($r = -0.293, p = 0.116$).

Таким образом, минеральные и органические удобрения оказывали разнонаправленное влияние на кислотность серой лесной почвы. Мета-анализ 105 экспериментов, проведенных на разных типах почв в мире, показал снижение рН почвы при применении минеральных азотных удобрений и соломы, тогда как использование навоза приводило к повышению рН почвы [23]. На дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве длительное применение минеральных удобрений оказало существенное влияние на кислотность почвы по всему 1-метровому слою, в то время как дополнительное внесение навоза смягчало подкисляющее действие минеральных удобрений [46]. Однако в 15-летнем эксперименте на слабощелочной почве снижение рН почвы наблюдали как в вариантах с минеральными удобрениями, так и с навозом [51]. По мнению этих авторов, влияние навоза на рН почвы зависело от источника навоза и характеристик почвы. Снижение рН в слабощелочных почвах могло быть вызвано присутствующими в навозе органическими кислотами. В то же время, присутствие карбонатов и бикарбонатов в навозе может повысить рН кислой почвы.

Изменение обеспеченности серой лесной почвы подвижными P_2O_5 и K_2O . Содержание подвижного фосфора в почве является ключевым признаком ее уровня плодородия, а повышение запасов P_2O_5 свидетельствует о росте окультуренности [18, 52]. В свою очередь, содержание и запасы подвижного калия определяют агрохимические ценные свойства почвы, плодородие и продуктивность почв в целом. Калийный режим пахотных почв зависит от насыщенности севооборотов пропашными культурами, которые выносят значительные количества калия и снижают содержание его подвижных форм, а также от количества и длительности применения калийных удобрений и навоза, повышающих обеспеченность почвы подвижным калием [53]. В производственных условиях на дерново-подзолистых и серых лесных почвах урожай культур коррелировал с содержанием в почве подвижных форм фосфора ($r = 0.30–0.50$) и калия ($r = 0.28–0.49$), тогда как в степной и сухостепной зонах эта связь была менее отчетливой [6].

В серой лесной почве без удобрений за 9 лет наблюдений содержание подвижного P_2O_5 уменьшилось в 1.3 раза, при внесении возрастающих доз

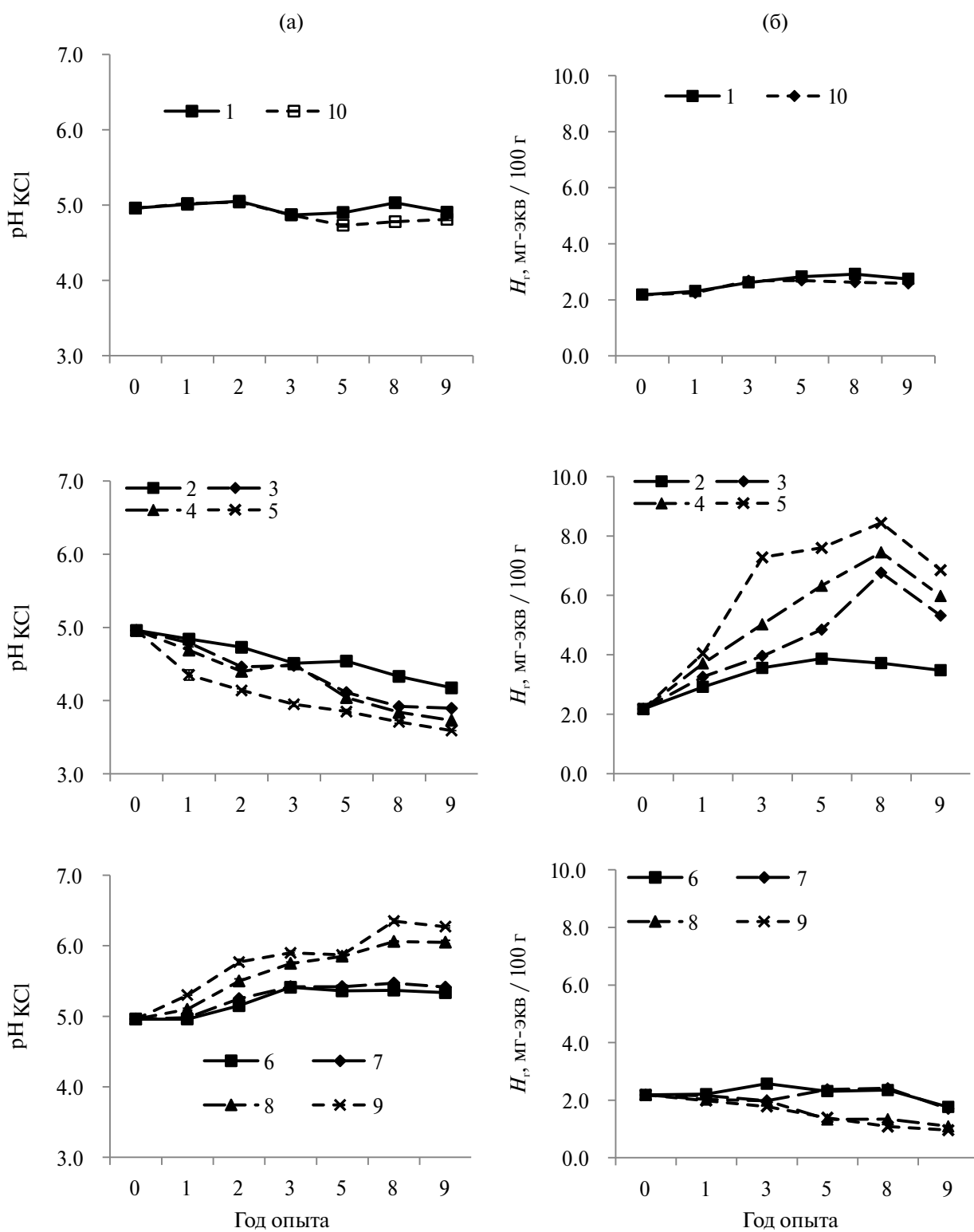


Рис. 3. Изменение обменной (а) и гидролитической (б) кислотности почвы при ежегодном применении минеральных и органических удобрений в возрастающих дозах.

НРК возросло в 1.6–7.1 раза, в вариантах с органическими удобрениями увеличилось в 2.2–7.4 раза в зависимости от дозы навоза (рис. 4).

При внесении экстремальных доз минеральных и органических удобрений содержание подвижного P_2O_5 достигало 480–630 и 444–650 мг/кг соответственно, что свидетельствовало о зафосфачивании и переудобренности почвы. Содержание подвижного фосфора в почве достоверно зависело от величины ежегодных доз минеральных и органических удобрений ($r = 0.767$, $p < 0.001$ и $r = 0.705$, $p < 0.001$ соответственно) и от суммарного количества фосфора, внесенного в почву с этими удобрениями ($r = 0.968$, $p < 0.001$ и $r = 0.972$, $p < 0.001$ соответственно) в течение 9-ти лет эксперимента. Влияние длительности внесения возрастающих доз минеральных ($r = 0.530$, $p = 0.001$) и органических ($r = 0.588$, $p < 0.001$) удобрений на изменение обеспеченности серой лесной почвы подвижным фосфором также было существенным. В дерново-подзолистой тяжелосуглинистой почве за 20 лет опыта в варианте без удобрений происходило снижение содержания подвижного P_2O_5 в 1.1 раза, при применении умеренных доз минеральных удобрений – увеличивалось в 1.2–2.6 раза, а при внесении навоза из расчета 5.7 т/га в год – в 1.2 раза [46, 54].

Влияние возрастающих доз удобрений и длительности их применения на содержание и динамику подвижного калия в серой лесной почве было сходным с таковым для подвижного фосфора. Содержание K_2O в почве без удобрений уменьшилось в 1.1 раза, при внесении возрастающих доз НРК возросло в 3.0–7.7 раза, в вариантах с навозом увеличилось в 2.1–5.5 раза в зависимости от дозы навоза (рис. 4). При умеренных и высоких дозах минеральных и органических удобрений в почве создавался высокий уровень содержания подвижного калия (137–222 и 156–210 мг/кг соответственно). Применение экстремальных доз минеральных удобрений и навоза приводило к переудобренности с содержанием в почве подвижного K_2O вплоть до 350–560 и 281–401 мг/кг соответственно. Содержание подвижного калия в почве достоверно коррелировало с ежегодными дозами внесенного сернокислого калия ($r = 0.884$, $p < 0.001$) и суммарным его количеством в течение 9-ти лет внесения ($r = 0.893$, $p < 0.001$). Повышение доз навоза и суммарное его поступление в почву за 9 лет опыта давало достоверное увеличение обеспеченности почвы подвижным калием ($r = 0.862$, $p < 0.001$ и $r = 0.913$, $p < 0.001$ соответственно). Прирост содержания подвижного калия в почве от экстремальных доз минеральных удобрений и навоза оказалась соответственно в 1.9 и 1.3 раза больше, чем от умеренных и высоких доз. Продолжительность внесения калийных удобрений и навоза было значимым фактором накопления в почве подвижного

калия ($r = 0.425$, $p = 0.011$ и $r = 0.478$, $p = 0.004$ соответственно), но судя по коэффициентам корреляции менее существенным, чем дозы удобрений.

Примененные в опыте минеральные и органические удобрения не только компенсировали вынос фосфора и калия урожаем культур, но и создавали в почве переходящий запас этих элементов в подвижных формах с прямой зависимостью от количества внесенных удобрений и продолжительности их применения. Были получены уравнения регрессии, отражающие зависимости между суммарным поступлением удобрений в почву в течение 9-ти лет опыта и изменением содержания подвижных P_2O_5 и K_2O в среднесуглинистой серой лесной почве [55]. Согласно полученным уравнениям, для повышения содержания подвижного P_2O_5 на 10 мг/кг требовалось внести дополнительно фосфорных удобрений 55 кг/га или свежего навоза КРС 20 т/га, а для повышения содержания подвижного K_2O на 10 мг/кг – калийных удобрений 85 кг/га или навоза 30 т/га. По существующим нормативам, установленным расчетными способами, для повышения содержания подвижных P_2O_5 и K_2O на 10 мг/кг в суглинистой серой лесной почве рекомендуется вносить фосфорных удобрений 90–100 кг/га и калийных удобрений 35–45 кг/га [18]. Выявленные различия в затратах фосфорных и калийных удобрений на накопительный сдвиг подвижных форм фосфора и калия в почве могли быть обусловлены как разными способами определения “нормативных доз”, так и неодинаковым набором агрохимических характеристик почв и возделываемых культур в севооборотах. Как показано ранее, дозы расхода удобрений на накопление в почве 10 мг/кг P_2O_5 и K_2O зависели от гранулометрического состава, содержания органического вещества, pH почвы, исходного содержания подвижных фосфора и калия [18, 52].

Таким образом, внесение фосфора и калия с минеральными и органическими удобрениями в сопоставимых дозах дало сходное увеличение обеспеченности серой лесной почвы подвижными формами этих элементов. В почве с органической системой удобрения не обнаружили недостатка подвижного фосфора, как это бывает в условиях органического земледелия. Применение высоких и экстремально высоких доз фосфорно-калийных минеральных удобрений или навоза КРС приводило к быстрому накоплению в серой лесной почве подвижных P_2O_5 и K_2O до сверхвысоких уровней. Переудобренность почвы не сопровождалась насыщением почвы подвижными формами фосфора и калия.

Содержание углерода и азота в серой лесной почве при ежегодном внесении возрастающих доз минеральных и органических удобрений. Содержащееся в почве органическое вещество опосредованно влияет

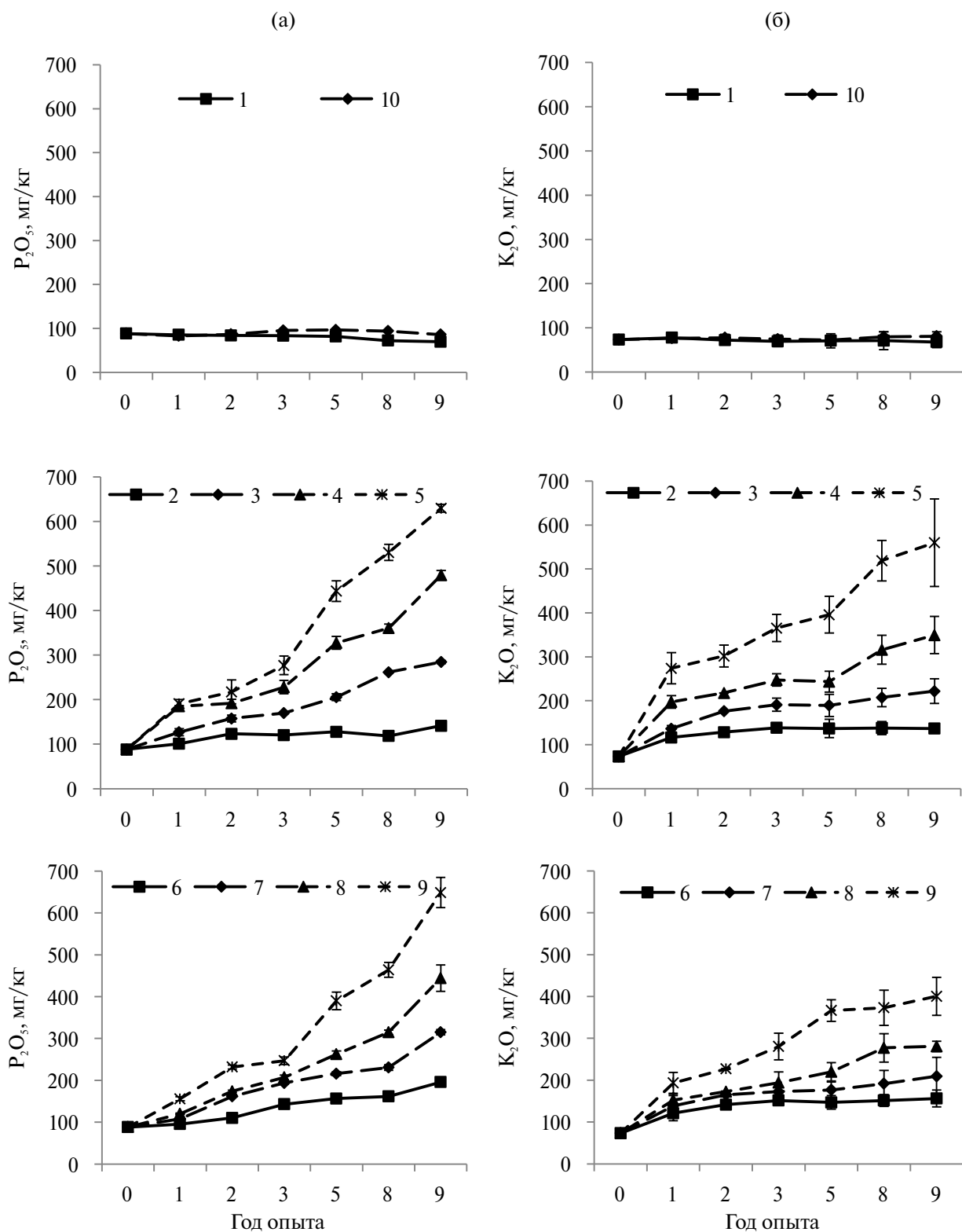


Рис. 4. Изменение содержания подвижных форм P_2O_5 (а) и K_2O (б) в почве в течение 9-летнего применения минеральных и органических удобрений в возрастающих дозах.

на урожай культур, выступая источником азота и других элементов минерального питания, создавая комфортные для растений водно-физические свойства, поддерживая и регулируя микробную активность, контролируя трансформацию удобрений в почве. Улучшение минерального и особенно азотного питания растений происходит уже при повышении содержания в почве $C_{орг}$ на 0.1–0.2%, а прирост $C_{орг} \geq 0.3\%$ обеспечивает улучшение водно-физических свойств почвы [56]. Мета-анализ мировых данных показал наличие положительной связи между концентрацией $C_{орг}$ в почве в интервале от 0.1 до 2.0% и урожаем пшеницы и кукурузы независимо от применения минеральных удобрений, которая нивелировалась выше критического уровня 2% $C_{орг}$ [57]. Для лесостепных черноземов средне- и тяжелосуглинистого гранулометрического состава критический уровень содержания $C_{орг}$ составляет 2.0–2.3% [58].

Применение минеральных и органических удобрений – важные факторы, определяющие содержание, качество и функции почвенного органического вещества. В микрополевоом опыте за 9 лет исследования содержание $C_{орг}$ в почве при внесении возрастающих доз минеральных удобрений увеличилось в среднем на 0.25%, в вариантах с органическими удобрениями – на 0.70–1.44% в зависимости от дозы навоза (рис. 5).

При применении навоза почва обогащалась органическим веществом самого навоза и растительных остатков, тогда как в случае с минеральными удобрениями единственным источником поступления органического вещества в почву были пожнивные и корневые остатки возделываемых культур. Полученные данные согласуются с результатами большого числа опытов в РФ и в мире, показывающими неустойчивое увеличение содержания $C_{орг}$ в почве при минеральной системе удобрения и значимое обогащение почвы органическим веществом – при органической системе [18, 23, 44, 45, 58–62].

Содержание в почве валового органического углерода достоверно зависело от продолжительности применения ($r = 0.860$, $p < 0.001$) возрастающих доз минеральных удобрений и суммарного поступления питательных веществ с удобрениями за годы исследования ($r = 0.672$, $p < 0.001$), а влияние ежегодных доз НРК было не значимым. Напротив, установлена прямая зависимость содержания $C_{орг}$ от ежегодных возрастающих доз навоза ($r = 0.793$, $p < 0.001$), суммарного количества навоза, внесенного в течение 9-ти лет ($r = 0.966$, $p < 0.001$) и продолжительности его внесения ($r = 0.628$, $p < 0.001$). Если при внесении доз навоза 25 и 50 т/га наблюдали достаточно равномерное повышение содержания $C_{орг}$ на протяжении 9-ти лет, то при экстремально высоких дозах 75 и 100 т/га после поступления навоза

КРС 700–900 т/га (50–65 т С/га) наметилась тенденция к насыщению почвы $C_{орг}$ на уровне $2.34 \pm 0.04\%$ [55]. Этот уровень $C_{орг}$ предложено считать нижней границей насыщения серой лесной почвы органическим веществом. Верхняя граница насыщения пахотной серой лесной почвы органическим углеродом составляла 2.75% и достигалась поступлением свежего навоза КРС 1300 т/га, что эквивалентно 95 т С/га.

Почвенные циклы углерода и азота тесно связаны между собой в виде многочисленных, разнообразных и сопряженных биотических процессов [25]. Применение азотных удобрений является главным фактором максимизации продуктивности сельскохозяйственных культур [30, 32]. Поступление в почву азота с минеральными удобрениями изменяет углеродно-азотное равновесие [63], свойственное почве, создавая предпосылки прайминг-эффекта [64] и различных вторичных эффектов, вызывающих экологические нарушения [31]. По результатам многолетних полевых опытов, длительное (4–107 лет) применение минеральных азотных удобрений (от 12 до 300 кг N/га) сопровождается чаще убылью (до -0.80 г N/кг) общего азота в почве, чем его приростом (до $+0.40$ г N/кг), показывая в среднем в опытах потери азота на уровне 0.10 г N/кг [65]. При этом, чем продолжительнее было применение удобрений, тем значительнее была убыль азота в почве. Наблюдаемое накопление общего азота в почве с увеличением дозы удобрений было связано с увеличением массы растительных остатков в результате роста урожая, а обеднение в присутствии азотных удобрений – ускорением разложения растительных остатков, азот которых реутилизировался растениями или терялся из почвы. По результатам одного из мета-анализов, внесение азотных удобрений в дозах 0–125, 126–250 и >250 кг/га почти пропорционально повышает содержание $N_{общ}$ в почве соответственно на 12, 16 и 27% [66]. Согласно другому обобщению, применение азотных удобрений в дозе 240 кг/га давало меньший прирост $N_{общ}$ в почве по сравнению с дозой в 120 кг/га [67]. Применение органических удобрений не давало особых преимуществ в обогащении почвы азотом в отличие от $C_{орг}$ по сравнению с минеральными удобрениями [66].

В микрополевоом опыте за 9 лет содержание $N_{общ}$ в серой лесной почве в вариантах с минеральными удобрениями возросло в 1.1–1.3 раза по сравнению с неудобренным контролем, с органическими удобрениями – в 1.3–1.6 раза, хотя в почву поступало примерно одинаковое количество азота (табл. 4).

В вариантах с минеральными удобрениями содержание $N_{общ}$ в почве теснее всего коррелировало с суммарным количеством азота удобрений на протяжении 9-ти лет ($r = 0.860$, $p < 0.001$) и менее

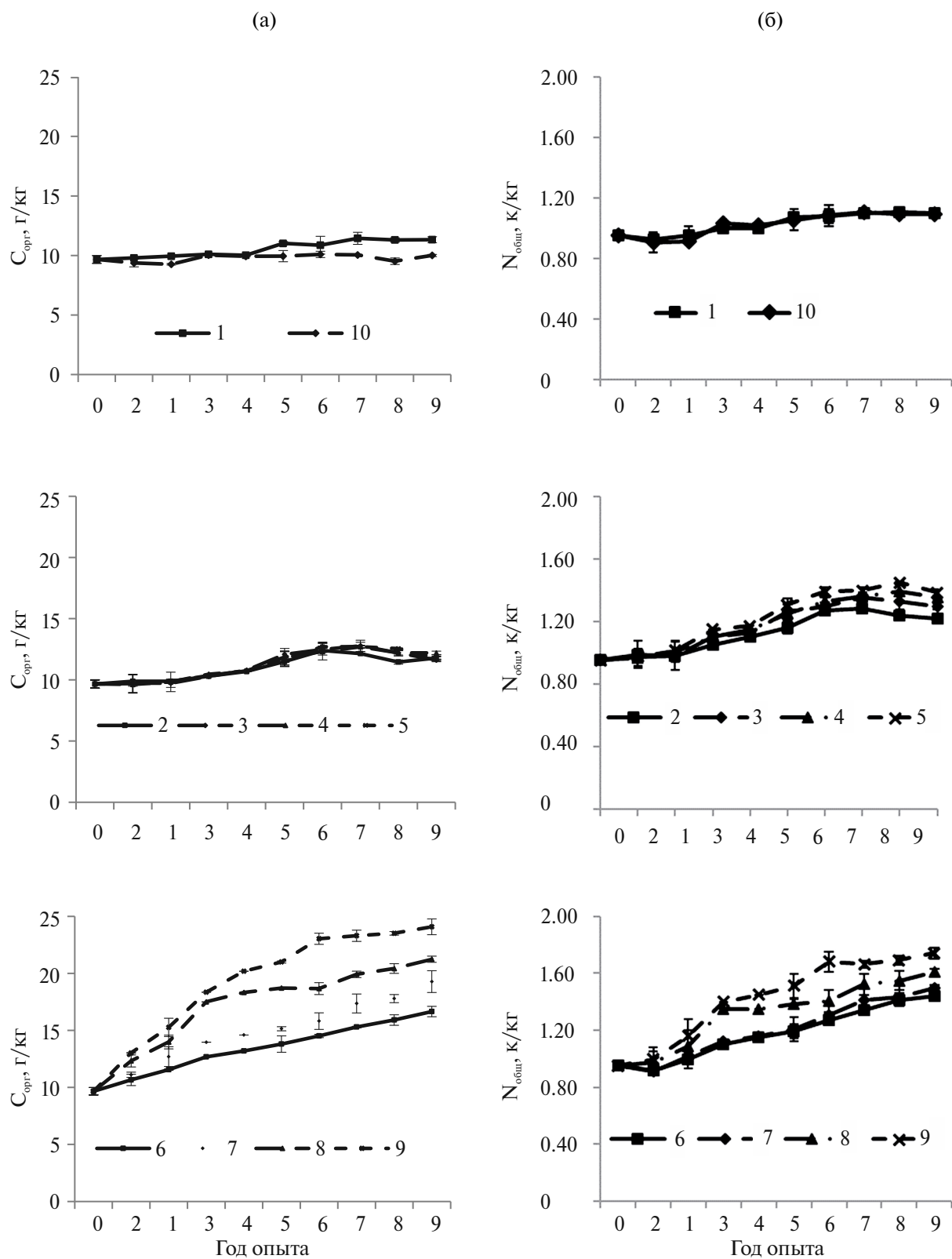


Рис. 5. Изменение содержания органического углерода (а) и общего азота (б) в почве в течение 9-летнего применения минеральных и органических удобрений в возрастающих дозах.

Таблица 4. Изменение агрохимических свойств серой лесной почвы при ежегодном внесении возрастающих доз минеральных и органических удобрений.

Вариант	Показатель					
	рН _{KCl}	C _{орг}	N _{общ}	N _{мин}	P ₂ O ₅	K ₂ O
		%			мг/кг почвы	
Чистый пар	5.02	0.94	0.09	1.36	83	77
	4.81	1.00	0.11	1.36	86	81
Без удобрений (контроль)	5.01	0.98	0.09	1.03	85	78
	4.91	1.13	0.11	0.96	70	68
N90P75K100	4.84	0.99	0.10	2.23	101	117
	4.18	1.18	0.12	3.03	141	137
N180P150K200	4.79	0.97	0.10	4.29	127	137
	3.90	1.16	0.13	4.00	284	222
N270P225K300	4.69	0.96	0.10	5.75	185	198
	3.73	1.22	0.14	30.22	480	350
N360P300K400	4.35	0.97	0.10	9.28	191	274
	3.59	1.18	0.14	39.33	630	560
Навоз 25 т/га	4.96	1.07	0.09	1.00	95	121
	5.34	1.67	0.14	2.84	196	156
Навоз 50 т/га	4.98	1.11	0.09	1.23	108	139
	5.42	1.93	0.15	6.02	315	210
Навоз 75 т/га	5.10	1.23	0.10	2.03	120	153
	6.05	2.12	0.16	7.83	444	281
Навоз 100 т/га	5.30	1.30	0.10	2.69	156	194
	6.27	2.41	0.17	15.00	649	401

Примечания. Над чертой – 1-й год опыта, под чертой – 9-й год опыта. Исходные данные приведены в разделе “Методика исследования”.

тесно – с числом лет, в течение которых применяли удобрения ($r = 0.787$, $p < 0.001$) и с ежегодными дозами удобрения ($r = 0.463$, $p = 0.001$). Та же последовательность факторов была характерна и для органического удобрения: коэффициент корреляции содержания N_{общ} в почве с суммарным количеством внесенного навоза был больше ($r = 0.931$, $p < 0.001$), чем с продолжительностью применения навоза ($r = 0.707$, $p < 0.001$) и его ежегодными дозами ($r = 0.623$, $p < 0.001$). Умеренные и высокие дозы минеральных удобрений обеспечивали более высокий прирост общего азота в почве, чем экстремальные, тогда как величины ежегодного прироста N_{общ} в почве от возрастающих доз органических удобрений были примерно одинаковыми. Как следствие, при ежегодном внесении полного минерального удобрения происходило сужение соотношения C : N в почве: с 10.2 в контроле до 9.7 и 8.5 при внесении доз N90P75K100 и N360P300K400 соответственно. В вариантах с ежегодным внесением навоза соотношение C : N в почве, наоборот, расширялось до 11.6 и 14.0 при дозах навоза 25 и 100 т/га.

Таким образом, систематическое применение минеральных и органических удобрений отражалось на азотно-углеродном режиме почвы,

оказывая разнонаправленное изменение соотношения C : N в почве. Сужение C : N в почве с минеральными удобрениями свидетельствовало о дефиците доступного углерода, необходимого для иммобилизации азота и наличии предпосылок для значительных его потерь в течение вегетационного периода и за осенне-зимние месяцы, особенно при внесении экстремально высоких доз удобрений. Применение органических удобрений создало более сбалансированное соотношение между углеродом и азотом в почве, способствуя накоплению азота в почве в 1.2–1.3 раза по сравнению с минеральной системой.

Эффективность секвестрации углерода при минеральной и органической системах. Современное земледелие должно быть высокопродуктивным, экономически рентабельным, устойчивым к глобальным изменениям климата, регенеративным и углерод-нейтральным, базирующимся на агротехнологиях, секвестрирующих углерод атмосферы. Секвестрация углерода в широком смысле – это абиотическое или биотическое улавливание (поглощение) атмосферного CO₂ и перемещение связанного углерода в другие долгоживущие резервуары для безопасного хранения [68]. Почвенная секвестрация углерода

представляет собой разновидность биотической секвестрации. По одному из ранних определений под почвенной секвестрацией углерода понимался “перевод атмосферного углерода в органическое вещество наземных экосистем и долговременное его сохранение в резервуаре почвенного органического вещества с минимальным риском немедленного возврата в атмосферу” [69]. В уточненном определении почвенная секвестрация углерода рассматривается как “перевод CO_2 атмосферы в живое органическое вещество растений (фотосинтез) с последующей трансформацией формирующейся мортмассы в почвенное органическое вещество (гумус) с периодом полного разложения (минерализации) составляющих его новообразованных компонентов от 10 до 100 лет” [70]. Наиболее употребляемым является определение, сформулированное в работе [71], согласно которому почвенная секвестрация углерода обозначает “процесс переноса CO_2 из атмосферы в почву земельной единицы посредством растений, растительных остатков и других органических твердых веществ, которые хранятся или удерживаются в почве данной земельной единицы как часть почвенного органического вещества (гумуса)”.

Научная интерпретация и практическая реализация идеи почвенной секвестрации углерода регламентируется несколькими положениями и принципами [68, 71–73]. Во-первых, образование первичной продукции фотосинтеза, поступление биомассы в почву и включение мортмассы в почвенное органическое вещество (разложение и стабилизация) – взаимосвязанные и равноправные этапы почвенной секвестрации углерода. Во-вторых, время удерживания (хранения) секвестрированного углерода в почве (наземном резервуаре) может варьировать от краткосрочного, но не сразу эмитируемого обратно в атмосферу, до долговременного. В-третьих, почвенная секвестрация углерода должна обеспечивать чистое увеличение содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве в течение определенного времени до уровня, превышающего предыдущий базовый уровень и привести к чистому снижению уровня CO_2 в атмосфере в виде прироста биомассы растений. В-четвертых, секвестрированным является углерод, поступающий непосредственно из атмосферы и в пределах конкретной земельной единицы с четко выраженными границами (делянка, поле, ферма, ландшафт, луг, лес, болото). Углерод, поступивший в почву естественным или искусственным путем из перемещенных источников (органические удобрения, растительные остатки, эрозионные отложения), не относится к секвестрированному. В-пятых, следует различать почвенную секвестрацию углерода и почвенное хранение (депонирование) углерода. Хранение применимо к увеличению запасов $\text{C}_{\text{орг}}$ с течением времени

в почвах данной земельной единицы, не обязательно связанное с чистым удалением CO_2 из атмосферы. Поскольку перечисленные принципы не всегда учитываются в исследованиях и при мониторинге потоков углерода, существуют разные толкования идеи почвенной секвестрации углерода, так и способов оценки ее практической результативности.

Минеральные удобрения способствуют производству первичной продукции, увеличивая надземную и подземную биомассу и обогащая почву органическим веществом, поэтому, с одной стороны, оптимальное снабжение растений азотом может иметь решающее значение для почвенной секвестрации углерода [74]. С другой стороны, азот минеральных удобрений может стимулировать био-разложение растительных остатков и органического вещества почвы с широким отношением $\text{C} : \text{N}$, уменьшая запасы $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве [25, 64]. Уместным будет заметить, что секвестрация углерода от применения минеральных удобрений будет кажущейся, если основная и побочная продукция будет изъята из агроэкосистемы, а в почве не произошло увеличения запасов $\text{C}_{\text{орг}}$.

Возврат остатков урожая в почву в виде животноводческих отходов (навоз, навозная жижа, компост) является ключевым этапом регенеративного земледелия, обеспечивающим рециркуляцию биофильных элементов и сохранение в составе ПОВ ранее секвестрированного углерода, предотвращая его быстрый и полный возврат в атмосферу в ходе хранения. Но увеличение содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве в этом случае не является признаком секвестрации углерода, поскольку органическое вещество просто перемещается и концентрируется в другом месте [73, 75, 76]. Секвестрирующий эффект свойственен навозу лишь в случае его внесения в удобрительных целях и в случае прироста не только $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве, но и урожая культур под действием навоза. Следовательно, секвестрирующими углерод являются такие мероприятия, которые обеспечивают рост продуктивности растений и накопление органического углерода в почве одновременно, а секвестрирующую эффективность приемов и средств следует оценивать, как минимум, по 2-м этим параметрам вместе, суммируя нормализованные отношения величины урожая и содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве испытуемых вариантов к контролю (1):

$$SE = [\ln(Y_v/Y_c) + \ln(C_v/C_c)] \times 100, \quad (1)$$

где SE – эффективность секвестрации (%), Y_v и Y_c – урожай варианта и контроля соответственно, C_v и C_c – содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ в почве варианта и контроля соответственно, 100 – пересчет в %.

Предполагается, что чем больше величина SE , тем больше эффективность секвестрации под действием используемого приема или средства. В нашем эксперименте урожай культур от внесения

Таблица 5. Эффективность секвестрации углерода при применении минеральных и органических удобрений

Вариант	Индекс прироста урожая культур, $\ln(Y_v/Y_c)$	Индекс прироста $C_{орг}$ в почве, $\ln(C_v/C_c)$	Эффективность секвестрации, %
N90P75K100	0.72	0.04	76
N180P150K200	1.15	0.06	120
N270P225K300	1.17	0.06	123
N360P300K400	0.95	0.06	101
Навоз 25 т/га	0.50	0.25	76
Навоз 50 т/га	0.87	0.35	123
Навоз 75 т/га	0.93	0.51	144
Навоз 100 т/га	0.78	0.62	140
Среднее вариантов NPK	1.00	0.05	105
Среднее вариантов применения навоза	0.77	0.43	120

минеральных удобрений был в среднем в 1.3 раза больше, чем от применения органических удобрений, но содержание $C_{орг}$ в почве от ежегодного внесения навоза было больше более чем в 1.5 раза, чем от NPK. Иными словами, минеральные удобрения больше способствовали росту первичной продукции фотосинтеза, а органические удобрения давали более значимый прирост почвенного $C_{орг}$, обеспечивая его хранение в почве. В целом в опыте эффективность секвестрации углерода при органической системе удобрения была на 15% больше, чем при минеральной системе (табл. 5).

В разные годы эффективность секвестрации углерода при применении возрастающих доз минеральных удобрений менялась от 3 до 218%, в вариантах с навозом – от 32 до 248%. Среди вариантов с минеральной системой наибольшую эффективность секвестрации углерода давали дозы N180P150K200 и N270P225K300, с органической системой – навоз KPC 75 т/га. Можно заметить, что секвестрирующий эффект экстремально высоких доз минеральных и органических удобрений был на 25 и 66% больше, чем умеренных доз N90P75K100 и навоза 25 т/га. Этот факт может стать аргументом максимизации урожая сельскохозяйственных культур и обуглероживания почвы за счет применения минеральных и органических удобрений в дозах, превышающих физиологические потребности растений. Однако в этом случае возрастает вероятность эвтрофикации почвы, что является характерным признаком “переудобренности” (Over-fertilization) [55]. Эвтрофикация, в свою очередь, несет угрозу деградации физико-химических свойств почвы, изменения таксономического состава микробного сообщества, нарушения циклов биофильных элементов в почвенной экосистеме и в сопредельных средах. Получить запланированный прирост урожая и содержания органического углерода в почве, избежав

переудобренности и насыщения почвы органическим углеродом, можно применением органоминеральной системы удобрения, внося уменьшенные дозы NPK и навоза. Другой путь – это использование агротехнических приемов, которые способствуют секвестрации углерода и обогащению почвы органическим веществом, не требуя интенсивного применения удобрений в повышенных дозах. Таковыми традиционно являются посевы покровных, промежуточных и сидеральных культур, биомассу которых можно полностью заделывать в почву.

В целом агроцены обладают высоким потенциалом секвестрации углерода, однако значительная часть биомассы, синтезированной сельскохозяйственными культурами, не возвращается в почву, а более половины углерода растительных остатков минерализуется в почве, возвращаясь в атмосферу [77]. В этой связи важно не только в полной мере инкорпорировать растительные остатки в почву, но и предусмотреть мероприятия по усилению стабилизации продуктов разложения в почве (агрегация, комплексообразование, сорбция минералами и др.), способствующих сохранности почвенного органического вещества.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, минеральные и органические удобрения, примененные в эквивалентных дозах по NPK, оказывали разное действие на величину урожая сельскохозяйственных культур, pH почвы, содержание в серой лесной почве органического углерода и общего азота, но давали сходное обогащение почвы подвижными формами фосфора и калия.

При применении возрастающих доз минеральных удобрений урожай культур в среднем за 2 ротации севооборота был на 29% больше, чем

от внесения навоза крупного рогатого скота (КРС). Нетребовательность возделываемых культур к систематическому внесению высоких доз минеральных (от N180P150K200 до N270P225K300) и органических (50–75 т/га) удобрений уменьшалась в следующей последовательности: кукуруза на зеленую массу > сахарная свекла > картофель > лук. Минеральные удобрения в экстремальных дозах (N360P300K400) сильнее угнетали продуктивность культур, чем органические удобрения (навоз КРС 100 т/га). Быстрое истощение неудобренной серой лесной почвы сопровождалось значительным уменьшением продуктивности культур во 2-й ротации севооборота.

Прогрессирующая ацидификация почвы — одна из причин уменьшения прибавки урожая при систематическом внесении минеральных удобрений. Чем больше была доза минеральных удобрений и продолжительнее их применение, тем сильнее подкислялась почва. Внесение навоза повышало рН почвы и устраняло ее гидролитическую кислотность. Систематическое применение полного минерального удобрения и навоза в одинаковой мере обогащало почву подвижными фосфором и калием с прямой зависимостью от доз удобрений. Накопительный сдвиг содержания подвижных форм фосфора в почве на 10 мг/кг достигался внесением фосфорных удобрений 55 кг/га или свежего навоза КРС 20 т/га, подвижного K_2O — соответственно внесением калийных удобрений 85 кг/га или навоза 30 т/га. Высокие и экстремально высокие дозы минеральных и органических удобрений создавали переудобренность почвы со сверхвысоким накоплением подвижных форм фосфора и калия. Переудобренность почвы не сопровождалась насыщением почвы подвижными формами фосфора и калия.

Незначительное повышение содержания $C_{орг}$ на 0.25% в почве при внесении полного минерального удобрения определялось длительностью применения НРК и не зависело от внесенных доз. Вклад дозы навоза в увеличение обеспеченности почвы $C_{орг}$ на 0.70–1.44% был более существенным, чем длительность его применения. Обнаруживалось насыщение почвы органическим углеродом при ежегодном внесении навоза 100 т/га на протяжении 9-ти лет. Внесение азота с навозом давало больший прирост содержания $N_{общ}$ в почве, чем с минеральными удобрениями. Содержание $N_{общ}$ в почве повышалось пропорционально внесенным дозам навоза, а умеренные и высокие дозы минеральных удобрений давали более высокий прирост содержания общего азота в почве, чем экстремальные. Применение минеральной системы удобрения вело к уменьшению соотношения C : N в почве, органической — к расширению, создавая более сбалансированное соотношение между углеродом и азотом в почве.

Повышение продуктивности культур и накопление $C_{орг}$ в почве являются двуедиными критериями почвенной секвестрации углерода с помощью агроприемов. Минеральные и органические удобрения на стадии их получения не являются углеродсеквестрирующими средствами, но становятся таковыми при удобрении сельскохозяйственных культур. Эффективность секвестрации углерода при органической системе удобрения была на 15% больше, чем при минеральной системе. Минеральные удобрения больше способствовали образованию биомассы растений, а органические удобрения — накоплению $C_{орг}$ в почве. Оценка секвестрирующей эффективности агроприемов должна предусматривать определение стабильности и сохранности секвестрированного углерода по соотношению лабильных и стабильных, потенциально-минерализуемых и устойчивых к минерализации пулов углерода в составе почвенного органического вещества.

Авторы выражают благодарность ЦКП ФИЦ ПНЦБИ РАН за приборное обеспечение исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шафран С.А.* Динамика плодородия почв Нечерноземной зоны и ее резервы // *Агрохимия*. 2016. № 8. С. 3–10.
2. *Алифанов В.М.* Палеокриогенез и современное почвообразование. Пушкино: ОНТИ НЦБИ РАН, 1995. 318 с.
3. *Ахтырцев Б.П., Шевченко Г.А.* Изменение агрохимических свойств серых лесных почв Центральной черноземной полосы при их окультуривании // *Агрохимия*. 1965. № 4. С. 38–50.
4. *Никитишен В.И.* Плодородие почвы и устойчивость функционирования агроэкосистемы. М.: Наука, 2002. 258 с.
5. *Никитишен В.И., Курганова Е.В.* Плодородие и удобрение серых лесных почв ополей Центральной России. М.: Наука, 2007. 367 с.
6. *Сычев В.Г.* Современное состояние плодородия почв и основные аспекты его регулирования. М.: РАН, 2019. 328 с.
7. *Никитишен В.И., Личко В.И.* Формирование продуктивности агроэкосистем при применении минеральных удобрений и действии климатических факторов в условиях ополей Центральной России // *Агрохимия*. 2008. № 12. С. 20–28.
8. *Лебедева Т.Н., Семенов В.М.* Эффективность применения минеральных удобрений под картофель при обычных и экстремальных гидротермических условиях вегетационного периода // *Агрохимия*. 2016. № 2. С. 51–59.

9. Кудеяров В.Н. Оценка питательной деградации пахотных почв России // Вестн. РАН. 2015. Т. 85. № 9. С. 771–775.
<https://doi.org/10.7868/S0869587315090078>
10. Кудеяров В.Н., Семенов В.М. Проблемы агрохимии и современное состояние химизации сельскохозяйственного производства в Российской Федерации // Агрохимия. 2014. № 10. С. 3–17.
11. Сычев В.Г., Шафран С.А., Виноградова С.Б. Плодородие почв России и пути его регулирования // Агрохимия. 2020. № 6. С. 3–13.
<http://dx.doi.org/10.31857/S0002188120060125>
12. Сельское хозяйство в России 2021. Стат. сб. М.: Росстат, 2021. С. 38–41.
13. Кудеяров В.Н., Соколов М.С., Глинушкин А.П. Современное состояние почв агроценозов России, меры по их оздоровлению и рациональному использованию // Агрохимия. № 6. 2017. С. 3–11.
<http://dx.doi.org/10.7868/S0002188117060011>
14. Кудеяров В.Н. Почвенно-биогеохимические аспекты состояния земледелия в РФ // Почвоведение. 2019. № 1. С. 109–121.
<http://dx.doi.org/10.1134/S0032180X1901009X>
15. Семенов В.М. Современные проблемы и перспективы агрохимии азота // Пробл. агрохим. и экол. 2008. № 1. С. 55–63.
16. Соколов М.С., Семенов А.М., Спиридонов Ю.Я., Торопова Е.Ю., Глинушкин А.П. Здоровая почва – условие устойчивости и развития агро- и социосфер (проблемно-аналитический обзор) // Изв. РАН. Сер. биол. 2020. № 1. С. 12–21.
<http://dx.doi.org/10.31857/S0002332920010142>
17. Mäder P., Fließbach A., Dubois D., Gunst L., Fried P., Niggli U. Soil fertility and biodiversity in organic farming // Science. 2002. V. 296 № 5573. P. 1694–1697.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1071148>
18. Сычев В.Г., Налиухин А.Н., Шевцова Л.К., Рухович О.В., Беличенко М.В. Влияние систем удобрения на содержание почвенного органического углерода и урожайность сельскохозяйственных культур: результаты длительных полевых опытов Географической сети России // Почвоведение. 2020. № 12. С. 1521–1536.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X20120138>
19. Aulakh C.S., Sharma S., Thakur M., Kaur P. A review of the influences of organic farming on soil quality, crop productivity and produce quality // J. Plant Nutr. 2022. V. 45 № 12. P. 1884–1905.
<https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2027976>
20. Geng Y., Cao G., Wang L., Wang S. Effects of equal chemical fertilizer substitutions with organic manure on yield, dry matter, and nitrogen uptake of spring maize and soil nitrogen distribution // PLoS One. 2019. V. 14(7). Art. № e0219512.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219512>
21. Francioli D., Schulz E., Lentendu G., Wubet T., Buscot F., Reitz T. Mineral vs. organic amendments: microbial community structure, activity and abundance of agriculturally relevant microbes are driven by long-term fertilization strategies // J. Front. Microbiol. 2016. V. 7. Art. № 1446.
<https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01446>
22. Bebbler D.P., Richards V.R. A meta-analysis of the effect of organic and mineral fertilizers on soil microbial diversity // Appl. Soil Ecol. 2022. V. 175. Art. № 104450.
<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104450>
23. Dang P., Li C., Lu Ch., Zhang M., Huang T., Wan Ch., Wang H., Chen Y., Qin X., Liao Y., Siddique K.H.M. Effect of fertilizer management on the soil bacterial community in agroecosystems across the globe // J. Agricult. Ecosyst. Environ. 2022. V. 326. P. 1–8.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107795>
24. Семенов В.М., Лебедева Т.Н. Проблема углерода в устойчивом земледелии: агрохимические аспекты // Агрохимия. 2015. № 11. С. 3–12.
25. Семенов В.М. Функции углерода в минерализационно-иммобилизационном обороте азота в почве // Агрохимия. 2020. № 6. С. 78–96.
<https://doi.org/10.31857/S0002188120060101>
26. Liu S., Wang J., Pu S., Blagodatskaya E., Kuzyakov Y., Razavi B.S. Impact of manure on soil biochemical properties: A global synthesis // J. Sci. Total Environ. 2020. V. 745. Art. No. 141003. P. 1–15.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141003>
27. Semenov M.V., Krasnov G.S., Semenov V.M., van Bruggen A. Mineral and organic fertilizers distinctly affect fungal communities in the crop rhizosphere // J. Fungi. 2022. V. 8(3). Art. № 251.
<https://doi.org/10.3390/jof8030251>
28. Никитин Д.А., Семенов М.В., Ксенофонтова Н.А., Тхакахова А.К., Русакова И.В., Лукин С.М. Влияние внесения соломы на состояние микробиома дерново-подзолистой почвы // Почвоведение. 2023. № 5. С. 640–653.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22601189>
29. Семенов М.В., Ксенофонтова Н.А., Никитин Д.А., Тхакахова А.К., Лукин С.М. Микробиологические показатели дерново-подзолистой почвы и ризосферы в полувековом полевом опыте с применением разных систем удобрения // Почвоведение. 2023. № 6. С. 715–729.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22601220>
30. Соколов О.А., Семенов В.М., Пачепский Я.А. Закономерности действия азотных удобрений на продуктивность растений // Изв. АН СССР. Сер. биол. 1986. № 6. С. 824–833.
31. Кудеяров В.Н., Биелек П., Соколов О.А., Кноп К., Пругар Я., Семенов В.М., Башкин В.Н., Моцик А., Скоржепова И., Шабает В.П., Никитишен В.И. Баланс азота и трансформация азотных удобрений в почвах. Пушкино: ОНТИ, 1986. 160 с.

32. Романенков В.А., Беличенко М.В., Рухович О.В., Никитина Л.В., Иванова О.И. Эффективность использования азота в длительных и краткосрочных опытах агрохимслужбы и Геосети Российской Федерации // *Агрохимия*. 2020. № 12. С. 28–37. <https://doi.org/10.31857/S0002188120120091>
33. Семенов В.М. Слагаемые эффективности азотных удобрений в системе почва–растение и критерии их количественной оценки // *Агрохимия*. 1999. № 5. С. 25–32.
34. Шафран С.А. Научные основы и современные методы определения доз применения минеральных удобрений. М.: ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова, 2022. 236 с.
35. Минеев В.Г., Ремпе Е.Х. Экологические последствия длительного применения повышенных и высоких доз минеральных удобрений // *Агрохимия*. 1991. № 3. С. 35–49.
36. Hijbeek R., van Loon M.P., van Ittersum M.K. Fertiliser use and soil carbon sequestration: opportunities and trade-offs. Wageningen: CCAFS Working Paper, 2019. № 264. 23 p.
37. Паутова Н.Б., Семенова Н.А., Хромычкина Д.П., Лебедева Т.Н., Семенов В.М. Определение активного органического вещества в свежем подстилочном навозе биокинетическим методом // *Агрохимия*. 2018. № 9. С. 29–39. <https://doi.org/10.1134/S0002188118090107>
38. Семенов М.В., Железова А.Д., Ксенофонтowa Н.А., Иванова Е.А., Никитин Д.А. Куриный помет как органическое удобрение: технологии компостирования и влияние на почвенные свойства (обзор) // *Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева*. 2023. Вып. 115. С. 160–198. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-115-160-198>
39. Roß C.-L., Baumecker M., Ellmer F., Kautz T. Organic manure increases carbon sequestration far beyond the “4 per 1000 Initiative” goal on a sandy soil in the Thyrow long-term field experiment DIV.2 // *Agriculture*. 2022. V. 12. Art. № 170. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020170>
40. Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Хорошаев Д.А., Мякшина Т.Н., Сапронов Д.В., Жмурин В.А., Кудеяров В.Н. Анализ многолетней динамики дыхания почв в лесном и луговом ценозах Приокско-террасного биосферного заповедника в свете современных климатических трендов // *Почвоведение*. 2020. № 10. С. 1220–1236. <https://doi.org/10.31857/S0032188X20100111>
41. Алифанов В.М. Изменение серых лесных почв при сельскохозяйственном использовании // *Почвоведение*. 1979. № 1. С. 37–47.
42. Зинякова Н.Б., Семенов В.М. Влияние возрастающих доз органических и минеральных удобрений на пулы растворенного, подвижного и активно-го органического вещества в серой лесной почве // *Агрохимия*. 2014. № 6. С. 8–19.
43. Сычев В.Г., Соколов О.А., Завалин А.А., Шмырева Н.Я. Экология применения органических удобрений. М.: ВНИИА, 2017. 336 с.
44. Мерзлая Г.Е., Еськов А.И., Тарасов С.И. Действие и последствие навоза // *Плодородие*. 2011. № 3. С. 16–19.
45. Мерзлая Г.Е., Зябкина Г.А., Фомкина Т.П., Козлова А.В., Макшакова О.В., Волошин С.П., Хромова О.М., Панкратенкова И.В. Эффективность длительного применения органических и минеральных удобрений на дерново-подзолистой легкосуглинистой почве // *Агрохимия*. 2012. № 2. С. 37–46.
46. Васбиева М.Т. Изменение агрохимических показателей дерново-подзолистой почвы Предуралья при длительном применении удобрений // *Почвоведение*. 2021. № 1. С. 90–99. <https://doi.org/10.31857/S0032188X21010135>
47. Зинченко М.К., Селицкая О.В. Биологическая токсичность серой лесной почвы в зависимости от систем удобрений // *Агрохим. вестн.* 2011. № 5. С. 38–40.
48. Свистова И.Д., Стахурлова Л.Д., Еременко М.В., Бендяк А.Ю. Биотестирование длительно окультуренного чернозема выщелоченного разного уровня удобрённости // *Агрохимия*. 2011. № 5. С. 54–59.
49. Kong Y., Wang G., Chen W., Yang Y., Ma R., Li D., Shen Y., Li G., Yuan J. Phytotoxicity of farm livestock manures in facultative heap composting using the seed germination index as indicator // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2022. V. 247. Art. № 114251. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.114251>
50. Шильников И.А., Аканова Н.И. Известкование почв в современных условиях // *Плодородие*. 2011. № 3. С. 22–24.
51. Liang Q., Chen H., Gong Y., Fan M., Yang H., Lal R., Kuzyakov Y. Effects of 15 years of manure and inorganic fertilizers on soil organic carbon fractions in a wheat-maize system in the North China Plain // *J. Nutr. Cycl. Agroecos.* 2012. V. 92. P. 21–33. <https://doi.org/10.1007/s10705-011-9469-6>
52. Шафран С.А., Кирпичников Н.А., Ермаков А.А., Семенова А.И. Динамика содержания подвижного фосфора в почвах Нечерноземной зоны и его регулирование // *Агрохимия*. 2021. № 5. С. 14–20. <https://doi.org/10.31857/S0002188121050100>
53. Лазарев В.И., Лазарева Р.И., Ильин Б.С., Боева Н.Н. Калийный режим чернозема типичного его длительного сельскохозяйственного использования в различных агроэкосистемах // *Агрохимия*. 2020. № 2. С. 14–19. <https://doi.org/10.31857/S000218812002009X>
54. Митрофанова Е.М., Васбиева М.Т. Фосфатный режим дерново-подзолистой почвы при длительном

- применении органических и минеральных удобрений // *Агрохимия*. 2014. № 9. С. 13–19.
55. Семенов В.М., Лебедева Т.Н., Зинякова Н.Б., Соколов Д.А., Семенов М.В. Эвтрофикация пахотной почвы: сравнительное влияние минеральной и органической систем удобрения // *Почвоведение*. 2023. № 1. С. 58–73.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X22600676>
56. Шарков И.Н. Удобрения и проблема гумуса в почве // *Почвоведение*. 1987. № 11. С. 70–81.
57. Oldfield E.E., Bradford M.A., Wood S.A. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields // *Soil Interact. Open-access J.* 2019. V. 5. № 1. P. 15–32.
<https://doi.org/10.5194/soil-5-15-2019>
58. Шарков И.Н., Данилова А.А., Прозоров А.С., Самохвалова Л.М., Бушмелева Т.И., Шепелев А.Г. Воспроизводство гумуса как составная часть системы управления плодородием почвы: метод. пособ. Новосибирск: РАСХН, 2010. 36 с.
59. Шарков И.Н., Данилова А.А. Влияние агротехнических приемов на изменение содержания гумуса в пахотных почвах // *Агрохимия*. 2010. № 12. С. 72–81.
60. Körschens M. Long-term field experiments (LTEs) – importance, overview, soil organic matter // *Exploring and Optimizing Agricultural Landscapes, Innovations in Landscape Research* / Ed. A.G. Mueller. Switzerland: Springer Nature, 2021. Chapter 8. P. 215–231.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-67448-9_8
61. Tian K., Zhao Y., Xu X., Hai N., Huang B., Deng W. Effects of long-term fertilization and residue management on soil organic carbon changes in paddy soils of China: A meta-analysis // *Agricult. Ecosyst. Environ.* 2015. V. 204. P. 40–50.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2015.02.008>
62. Gross A., Glaser B. Meta-analysis on how manure application changes soil organic carbon storage // *Sci. Rep.* 2021. V. 11. Art. No. 5516.
<https://doi.org/10.1038/s41598-021-82739-7>
63. Кудеяров В.Н. Азотно-углеродный баланс в почве // *Почвоведение*. 1999. № 1. С. 73–82.
64. Семенов В.М. Образование экстра-азота в удобренных почвах и его роль в питании растений // *Агрохимия*. 1999. № 8. С. 5–12.
65. Mulvaney R.L., Khan S.A., Ellsworth T.R. Synthetic Nitrogen Fertilizers Deplete Soil Nitrogen: A Global dilemma for sustainable cereal production // *J. Environ. Qual.* 2009. V. 38. P. 2295–2314.
<https://doi.org/10.2134/jeq2008.0527>
66. Bohoussou N.D.Y., Han S.-W., Li H.-R., Kouadio Y.D., Ejaz I., Virk A.L., Dang Y.P., Zhao X., Zhang H.-L. Effects of fertilizer application strategies on soil organic carbon and total nitrogen storage under different agronomic practices: A meta-analysis // *Land Degradation and Development*. 2023. Online Version.
<https://doi.org/10.1002/ldr.4885>
67. Jin S. Recommended nitrogen fertilization enhances soil carbon sequestration in China’s monsoonal temperate zone // *Peer J.* 2018. V. 6. Art. № e5983. <https://doi.org/10.7717/peerj.5983>
68. Lal R. Carbon sequestration // *Philosoph. Trans. Royal Soc. B.* 2008. V. 363. P. 815–830.
<http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2007.2185>
69. Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А., Тулина А.С. Минерализуемость органического вещества и углеродсеквестрирующая емкость почв зонального ряда // *Почвоведение*. 2008. № 7. С. 819–832.
70. Козут Б.М., Семенов В.М., Артемьева З.С., Данченко Н.Н. Дегумусирование и почвенная секвестрация углерода // *Агрохимия*. 2021. № 5. С. 3–13.
<https://doi.org/10.31857/S0002188121050070>
71. Olson K.R. Soil organic carbon sequestration, storage, retention and loss in U.S. croplands: Issues paper for protocol development // *Geoderma*. 2013. V. 195–196. P. 201–206.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.12.004>
72. Chenu C., Angers D.A., Barré P., Derrien D., Arrouays D., Balesdent J. Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations // *Soil Till. Res.* 2019. V. 188. P. 41–52.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.011>
73. Brock C., Franko U., Wiesmeier M. Soil management for carbon sequestration // *Encyclopedia of Soils in the Environment (Second Edit.)*. 2023. V. 3. P. 424–432.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00124-5>
74. van Groenigen J.W., van Kessel C., Hungate B.A., Oenema O., Powlson D.S., van Groenigen K.J. Sequestering soil organic carbon: A Nitrogen dilemma // *Environ. Sci. Technol.* 2017. V. 51(9). P. 4738–4739.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.7b01427>
75. Кудеяров В.Н. Почвенное дыхание и секвестрация углерода (обзор) // *Почвоведение*. 2023. № 9. С. 1011–1022.
<https://doi.org/10.31857/S0032180X23990017>
76. Olson K.R., Al-Kaisi M.M., Lal R., Lowery B. Experimental consideration, treatments, and methods in determining soil organic carbon sequestration rates // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2014, V. 78(2). P. 348–360.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2013.09.041>
77. Семенов В.М., Паутова Н.Б., Лебедева Т.Н., Хромычкина Д.П., Семенова Н.А., Лопес де Гереню В.О. Разложение растительных остатков и формирование активного органического вещества в почве инкубационных экспериментов // *Почвоведение*. 2019. № 10. С. 1172–1184.

Effects of Long-Term Application of Mineral Fertilizers and Manure on Agrochemical Properties of Gray Forest Soil, Crops Productivity and Carbon Sequestration

N. B. Zinyakova^a, D. A. Sokolov^a, T. N. Lebedeva^a, S. N. Udal'tsov^a, V. M. Semenov^{a,b,#}

¹*Institute of Physicochemical and Biological Problems in Soil Science, RAS,
ul. Institutskaya 2, Moscow region Pushchino 142290, Russia*

²*All-Russian Research Institute of Phytopathology,
ul. Institute 5, Moscow region, Odintsovo district, p/o Bolshiye Vyazemy 143050, Russia*

[#]*E-mail: v.m.semenov@mail.ru*

The effect of long-term application of increasing doses of mineral (from N90P75K100 to N360P300K400) and organic (cattle manure from 25 to 100 t/ha) fertilizers on the fertility of gray forest soil was studied in the micro-plot experiment. Over 9 years, 0.81–3.24 t/ha of nitrogen, 0.68–2.70 t/ha of P₂O₅ and 0.90–3.60 t/ha of K₂O were applied with mineral fertilizers. Manure supplied 43–173 t/ha of dry matter, 16–65 t/ha of C_{org}, 0.85–3.41 t/ha of N_{tot}, 0.65–2.59 t/ha of P₂O₅ and 0.86–3.46 t/ha of K₂O. In the yield the mineral fertilizer system exceeded the organic one by an average of 29%. At extreme doses (N360P300K400 and 100 t/ha of cattle manure) mineral fertilizers reduced crop productivity more strongly than organic fertilizers. A direct linear relationship was found between the doses of mineral and organic fertilizers and the increase in the content of available P₂O₅ and K₂O in the soil. Application of extreme doses of fertilizers did not lead to saturation of the soil with available forms of phosphorus and potassium. Long-term application of organic fertilizers increased the soil pH_(KCl) by 0.4–1.3 units and mineral fertilizers decreased it by 0.8–1.4 units. Annual application of mineral fertilizers increased soil C_{org} content by an average of 0.02–0.04% per year, and organic fertilizers – by 0.08–0.17% per year. Manure application at 100 t/ha over 9 years led to the saturation of the soil with organic carbon. The C : N ratio in the soil under a mineral fertilizer system was decreased, while it with the organic system was increased. An approach to calculate the carbon sequestration efficiency for the assessment of different agronomic practices is proposed. It is shown that the carbon sequestration efficiency of the organic fertilizers was 15% higher than that of the mineral fertilizers.

Keywords: organic carbon, total nitrogen, mobile phosphorus, mobile potassium, soil pH, overfertilization.

УДК 631.84.7:631.813:633.11“321”

АГРОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ МОЧЕВИНЫ ПРОЛОНГИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ[§]

© 2024 г. В. М. Лапушкин^{1,2,*}, М. А. Волкова^{1,2}, А. А. Лапушкина^{1,2}, С. П. Торшин¹,
Ф. Г. Игралиев¹, А. М. Норов³, Д. А. Пагалешкин³, П. С. Федотов³,
В. В. Соколов³, И. М. Кочетова³, Е. А. Рыбин³

¹ Российский государственный аграрный университет—МСХА им. К.А. Тимирязева
127434 Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

² Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д.Н. Прянишникова
127434 Москва, ул. Прянишникова, 31а, Россия

³ Научно-исследовательский институт по удобрениям и инсектофунгицидам им. проф. Я.В. Самойлова
162625 Череповец, Северное шоссе, 75, Россия

*E-mail: lapushkin@rgau-msha.ru

Представлены результаты серии вегетационных опытов, в которых изучили влияние мочевины с покрытием гранул дигидрофосфатом кальция на формирование урожая яровой пшеницы. Показали, что капсулированная мочевина в сравнении с ее обычной формой обеспечивала увеличение урожая зерна яровой пшеницы на 9–13%. Покрытие гранул мочевины дигидрофосфатом кальция способствовало более равномерному высвобождению азота удобрения, повышая эффективность его использования растениями на 10–13%. Установлено, что эффективность капсулированной мочевины находится в прямой зависимости от толщины покрытия гранул.

Ключевые слова: азотные удобрения, мочевина пролонгированного действия, капсулированная мочевина, дигидрофосфат кальция, яровая пшеница, урожайность.

DOI: 10.31857/S0002188124040049, EDN: dlzqkv

ВВЕДЕНИЕ

Растущее мировое население требует увеличения продуктивности сельскохозяйственного производства, что, в свою очередь, приводит к увеличению спроса на удобрения [1–5].

Наиболее применяемыми агрохимикатами в сельскохозяйственном производстве являются азотные удобрения. В структуре мирового потребления минеральных удобрений на их долю приходится около 56%, а спрос на них на рынке каждый год возрастает в среднем на 3% [6–8].

Традиционные азотные удобрения вследствие высоких потерь азота характеризуются низкой агрономической и экономической эффективностью. Известно, что в результате вымывания нитратов из корнеобитаемого слоя, улетучивания аммиака, денитрификации и иммобилизации потери азота удобрений в совокупности могут достигать 70% [9–13].

[§] Работа выполнена за счет средств Программы развития университета в рамках Программы стратегического академического лидерства “Приоритет-2030”.

Потери азота из удобрений оказывают экологическую нагрузку на окружающую среду, вследствие выбросов парниковых газов (в частности — N₂O) в атмосферу, загрязнения грунтовых вод и эвтрофикации поверхностных вод [1, 11–15].

Таким образом, перед производителями азотных удобрений по-прежнему стоит задача совершенствования своей продукции с целью повышения ее эффективности и минимизации возможных негативных воздействий на окружающую среду [1, 15].

В последние десятилетия производители удобрений сосредоточились на производстве удобрений пролонгированного действия [13]. Капсулированная мочевина считается одним из перспективных удобрений длительного действия. Исследования показали, что мочевина с покрытием способна обеспечить прирост урожая зерновых культур до 40% [16]. Наиболее изучена мочевина, покрытая элементарной серой и полимерами различного происхождения.

Как показала практика применения, покрытие гранул мочевины серой малоэффективно из-за “взрывного” характера высвобождения элементов

питания. Применение удобрений с полимерным покрытием ограничивается тем, что большинство синтетических полимеров, применяемых для капсулирования, трудно разлагаемы, что приводит к их накоплению и загрязнению окружающей среды. Биоразлагаемые полимеры чувствительны к воде и обладают плохой пленкообразующей способностью, что снижает эффект пролонгации, усложняет процесс производства и повышает стоимость удобрений [15].

Таким образом, в настоящее время актуальна разработка новых экономически эффективных форм мочевины пролонгированного действия, соответствующих экологическим стандартам и обеспечивающих оптимальные темпы высвобождения азота.

Для решения вопроса, связанного со снижением потерь азота мочевины и ресурсосбережением, Научно-исследовательским институтом по удобрениям и инсектофунгицидам им. проф. Я.В. Самойлова были получены образцы мочевины с покрытием гранул дигидрофосфатом кальция [17].

В сельскохозяйственном производстве однозамещенный фосфат кальция, более известный как суперфосфат, является хорошо изученным и рекомендованным себя фосфорным удобрением. Данное неорганическое соединение в отличие от полимерных веществ не только легкодоступно и легко производимо на предприятиях по выпуску агрохимикатов, но и безопасно с экологической точки зрения.

Интенсивность высвобождения азота из капсулированной мочевины зависит от толщины покрытия гранулы дигидрофосфатом кальция, что подтверждено результатами лабораторных исследований. При этом оптимальная толщина покрытия гранул пока не определена.

В связи с вышеизложенным, цель работы – изучение эффективности новой формы мочевины пролонгированного действия с различной толщиной покрытия гранул дигидрофосфатом кальция на посевах яровой пшеницы.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования новой формы мочевины в период с 2020 по 2022 г. в вегетационном домике кафедры агрономической, биологической химии и радиологии РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева была проведена серия опытов на яровой пшенице сорта Любава. Любава – районированный сорт яровой пшеницы современной селекции “ФИЦ Немчиновка” и введенный в Государственный реестр селекционных достижений в 2012 г.

Вегетационные опыты проводили в четырехкратной повторности. Растения пшеницы выращивали в сосудах Митчерлиха вместимостью 5 кг сухой почвы. Для набивки сосудов использовали пахотный

горизонт дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы. Перед закладкой опыта почву известковали.

Агрохимические показатели пахотного горизонта почвы определяли по общепринятым методикам: содержание гумуса – по ГОСТ 26213-91 (метод Тюрина), pH_{KCl} – по ГОСТ 26483-85, гидролитическую кислотность – по ГОСТ 26212-2021 (метод Каппена), сумма поглощенных оснований – по ГОСТ 27821-88 (метод Каппена–Гильковица), содержание подвижных форм фосфора и обменного калия – по ГОСТ Р 54650-2011 (метод Кирсанова), содержание щелочегидролизующего азота – по Корнфилду.

В среднем за 3 года почва пахотного горизонта после известкования характеризовалась следующими агрохимическими показателями: содержание гумуса – низкое (2.57%), pH_{KCl} – близкий к нейтральному (pH 5.7), гидролитическая кислотность – низкая (1.58 мг-экв/100 г), сумма поглощенных оснований – высокая (13.2 мг-экв/100 г), емкость катионного обмена – высокая (14.8 мг-экв /100 г), степень насыщенности основаниями – высокая (89%), содержание щелочегидролизующего азота по Корнфилду – низкое (68 мг/кг), подвижных форм фосфора по Кирсанову – среднее (92 мг/кг), обменного калия по Кирсанову – повышенное (158 мг/кг).

В каждый сосуд высевали по 30 семян пшеницы. После появления всходов проводили прореживание, удаляя нетипичные растения и оставляя до созревания по 20 растений. Урожай убирали в фазе полной спелости зерна.

Схема опыта включала в себя 4 варианта: 1. РК – фон, 2. РК + мочевина без покрытия (вариант сравнения), 3. РК + мочевина капсулированная, толщина покрытия 50 мкм, 4. РК + мочевина капсулированная, толщина покрытия 100 мкм.

В качестве фосфорного и калийного удобрения применяли монокальцийфосфат и хлорид калия. Дозы удобрений устанавливали в соответствии с рекомендациями Журбицкого из расчета: N – 0.15, P_2O_5 –0.1, K_2O – 0.1 г д.в./кг почвы. При расчете доз удобрений учитывали снижение содержания азота в капсулированных удобрениях и содержание фосфора в нанесенных покрытиях.

Из приведенных микрофотографий распределения элементов питания по поверхности скола гранулы карбамида видно, что нанесенное покрытие плотно прилегало к поверхности гранулы и полностью ее обволакивало, имело достаточно прочную структуру без существенных дефектов и макропор. По поверхности гранулы покрытие было распределено в достаточной степени равномерно, заданная толщина выдержана (рис. 1).

Содержание азота в исходном удобрении – 46%, при нанесении покрытия толщиной 50 мкм, удобрение содержало 40% азота и 8% фосфора, при толщине

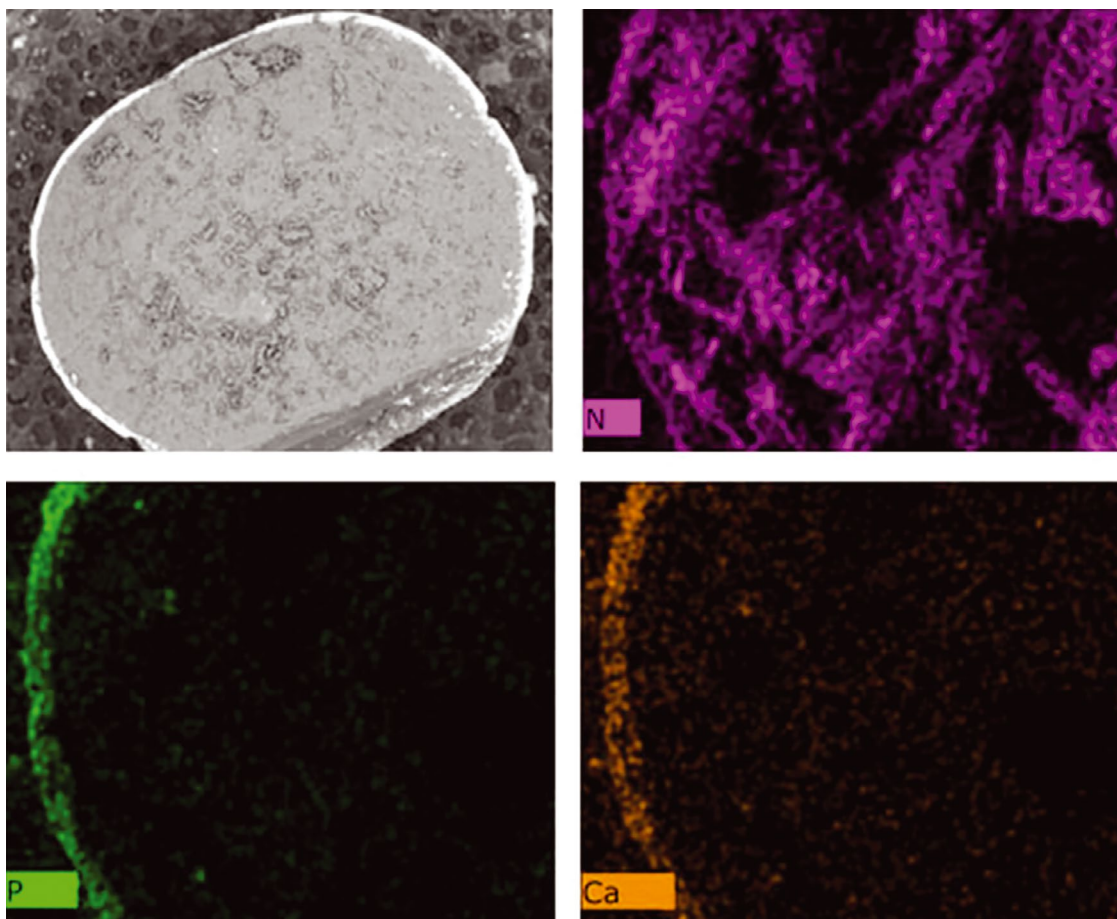


Рис. 1. Микрофотография скола гранулы капсулированного карбамида и распределение азота, фосфора и кальция по поверхности скола.

покрытия 100 мкм содержание азота снижалось до 35%, а фосфора увеличивалось до 14%.

Определение содержания азота, фосфора и калия в растительных образцах осуществляли в соответствии с общепринятыми методиками: содержание азота – ГОСТ 13496.4-93 (метод Кельдаля), фосфора – по ГОСТ 26657-97 (колориметрический метод), калия – по ГОСТ 30504-97 (пламенно-фотометрический метод). Перед определением основных элементов питания растительный материал (зерно и солома) озоляли в концентрированной серной кислоте в присутствии катализатора – металлического селена.

Данные вегетационных опытов были статистически обработаны методом дисперсионного анализа с помощью пакета анализа данных программы MSExcel.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно результатам вегетационных опытов, проведенных в 2020–2022 гг., новая форма мочевины пролонгированного действия с покрытием

гранул дигидрофосфатом кальция по сравнению с некапсулированной мочевиной обеспечивала наиболее оптимальное питание яровой пшеницы в течение вегетации, что способствовало формированию более высокого урожая.

В табл. 1 представлены урожаи за период исследования. В различные годы биологический урожай яровой пшеницы был неодинаков, при этом сохранялась единая тенденция к его изменению.

В 2020 г. по сравнению с обычной мочевиной в вариантах, где вносили капсулированную форму мочевины, масса зерна и соломы были больше на 13–18 и 8–15% соответственно. В 2021 г. достоверное увеличение массы зерна в сравнении контрольным вариантом (мочевины без покрытия) отмечено только в варианте, где в сосуды вносили капсулированную мочевину с толщиной покрытия гранул 100 мкм. Масса зерна в данном варианте была больше на 26%. Масса соломы изменялась не существенно. В 2022 г. – масса зерна увеличилась на 7–8, масса соломы – на 11–18%.

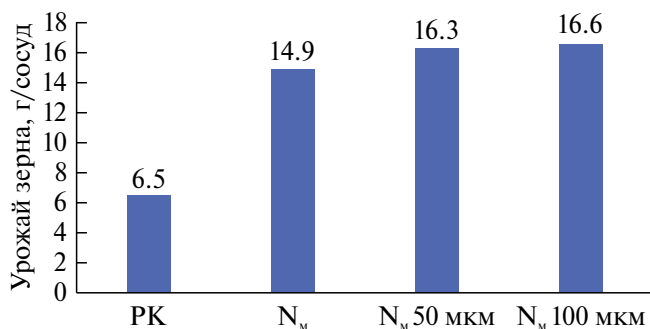


Рис. 2. Урожай яровой пшеницы в зависимости от формы примененной мочевины (среднее за 3 года).

В среднем за 3 года исследования урожай пшеницы в вариантах с внесением в почву капсулированной мочевины был больше на 9–13% (рис. 2).

Наибольший урожай зерна яровой пшеницы сорта Любава был получен в варианте с внесением в почву капсулированной мочевины с толщиной покрытия гранул 100 мкм.

В среднем за 3 года проведенного исследования урожай пшеницы увеличивался главным образом за счет улучшения биометрических показателей

растений и элементов структуры урожая. В сравнении с обычной мочевиной в вариантах с внесением удобрений с покрытием масса одного растения увеличивалась на 9–11, масса колоса – на 10, количество зерен в колосе – на 4–7% (табл. 2).

Кроме этого, при применении капсулированной мочевины у растений яровой пшеницы формировалось более выполненное зерно, о чем свидетельствуют данные массы 1000 зерен, которая была больше на 5–6% в сравнении с вариантом, где применяли обычную форму мочевины. Увеличение толщины покрытия с 50 до 100 мкм не влияло на изменение элементов структуры урожая.

С целью оценки доли полезной части урожая был рассчитан коэффициент хозяйственной эффективности ($K_{хоз}$). Под данным коэффициентом понимают отношение хозяйственной части урожая к биологическому урожаю. В среднем за 3 года исследования коэффициент хозяйственной эффективности урожая пшеницы повышался под действием азотных удобрений от 0.37 до 0.43 и не зависел от формы примененного удобрения.

Все формы мочевины оказали положительное влияние на химический состав урожая пшеницы (табл. 3).

Таблица 1. Урожай яровой пшеницы в зависимости от формы карбамида, г/сосуд

Вариант	2020 г.		2021 г.		2022 г.	
	зерно	солома	зерно	солома	зерно	солома
PK (фон)	4.4	9.6	4.0	8.7	11.2	15.4
PK + N _M (без покрытия)	13.6	20.6	5.4	14.4	25.7	27.5
PK + N _M 50 мкм	16.0	22.3	5.5	14.3	27.4	32.5
PK + N _M 100 мкм	15.3	23.6	6.8	13.0	27.8	30.4
HCP ₀₅	0.9	2.1	1.1	1.8	1.4	3.0

Таблица 2. Влияние разных форм мочевины на показатели структуры урожая яровой пшеницы (среднее за 2020–2022 гг.)

Вариант	Масса 1-го растения, г	$K_{хоз}$	Масса 1-го колоса, г	Количество зерен в колосе, шт.	Масса 1000 зерен, г
PK (фон)	0.98	0.37	0.4	11.4	29.3
PK + N _M (без покрытия)	1.98	0.42	1.0	21.7	34.4
PK + N _M 50 мкм	2.19	0.41	1.1	23.1	36.0
PK + N _M 100 мкм	2.16	0.43	1.1	22.5	36.3

Таблица 3. Влияние мочевины пролонгированного действия на химический состав урожая яровой пшеницы (среднее за 2020–2022 гг.)

Вариант	Содержание в зерне, %			Содержание в соломе, %		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
PK (фон)	2.04	1.00	0.38	0.32	0.23	1.70
PK + N _M (без покрытия)	2.84	0.95	0.38	0.63	0.17	1.72
PK + N _M 50 мкм	2.92	0.99	0.40	0.67	0.15	1.59
PK + N _M 100 мкм	2.87	0.95	0.36	0.71	0.15	1.69

Таблица 4. Вынос элементов питания урожаем яровой пшеницы и коэффициент использования азота удобрений (среднее за 2020–2022 гг.)

Вариант	Вынос зерном			Вынос соломой			Общий вынос			КИУ, %
	мг/сосуд									
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
РК (фон)	121	63	24	34	26	190	160	90	224	–
РК + N _м (без покрытия)	369	139	54	118	35	360	502	176	428	46
РК+N _м 50 мкм	423	164	65	139	34	373	577	200	453	56
РК+N _м 100 мкм	434	162	59	148	33	379	602	198	457	59

В среднем за 3 года опытов содержание азота фосфора и калия в основной и побочной продукции было оптимальным во всех вариантах с применением азотного удобрения.

Вместе с тем, мочевина с покрытием гранул дигидрофосфатом кальция способствовала усилению потребления азота растениями пшеницы. Наиболее высокое содержание азота в зерне пшеницы отмечено в вариантах с внесением капсулированной мочевины, что составило 2.87–2.92%, против 2.84% в варианте с обычной формой мочевины. Содержание азота в соломе растений возрастало с увеличением толщины покрытия гранул с 0.63% – при внесении обычной мочевины до 0.67 и 0.71% при толщине покрытия 50 и 100 мкм соответственно (табл. 3).

О повышении потребления азота пшеницей при внесении капсулированных форм мочевины свидетельствуют и результаты расчета выноса элементов питания урожаем (табл. 4).

При увеличении толщины покрытия гранул возрастал хозяйственный вынос азота. В сравнении с некапсулированной мочевиной вынос азота в вариантах, где применяли мочевину пролонгированного действия с тонким покрытием (50 мкм) был больше на 15%, с толстым покрытием (100 мкм) – на 20%. Следует отметить, что вынос фосфора и калия в вариантах с капсулированной мочевиной также был больше, чем в варианте сравнения. По сравнению с показателями в варианте с обычным карбамидом при применении мочевины с покрытием вынос фосфора был больше на 13–14, калия – на 6–7%. Это объясняется оптимизацией азотного питания растений и увеличением урожая.

Покрытие мочевины дигидрофосфатом кальция способствовало более полному усвоению растениями азота удобрений, т.е. повышало коэффициент его использования. При этом эффективность использования азота возрастала с увеличением толщины покрытия гранул удобрения. В варианте, где применяли мочевину с тонким покрытием (50 мкм), коэффициент использования азота из удобрения (КИУ) составлял 56%. При

толщине покрытия гранул 100 мкм КИУ достигал 59%. Таким образом, нанесение на гранулы мочевины дигидрофосфата кальция способствовало увеличению коэффициента использования азота на 10–13% в сравнении с некапсулированной формой мочевины, где КИУ был равен 46%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, применение мочевины пролонгированного действия с покрытием гранул дигидрофосфатом кальция на яровой пшенице способствовало улучшению показателей структуры урожая и, следовательно, позволило получить более высокий и качественный урожай зерна. В среднем за 3 года исследования мочевина с замедленным высвобождением азота обеспечила прибавку урожая зерна яровой пшеницы на 9–13% в сравнении с некапсулированной формой, а также формированию более выполненного зерна. Наибольший урожай зерна пшеницы был получен в варианте с внесением в почву капсулированной мочевины с толщиной покрытия гранул 100 мкм.

Применение мочевины с покрытием дигидрофосфатом кальция улучшало режим питания растений, наряду с повышением потребления растениями азота, увеличивался также вынос фосфора и калия. Коэффициент использования азота из капсулированной мочевины был на 10–13% больше обычного карбамида и возрастал с увеличением толщины покрытия гранул.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lewu F.B., Volova T., Sabu T., Rakhimol K.R.* Controlled release fertilizers for sustainable agriculture // Academic Press is an imprint of Elsevier. 2021. 253 p.
2. *Xie L.H., Liu M.Z., Ni B.L., Zhang X., Wang Y.F.* Slow-release nitrogen and boron fertilizers from a functional superabsorbent formulation based on wheat straw and attapulgite // Chem. Eng. J. 2011. V. 167. P. 342–348.
3. *Dimkpa C.O., Fugice J., Singh U., Lewis T.D.* Development of fertilizers for enhanced nitrogen use effi-

- ciency – Trends and perspectives // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 731. P. 1–12.
4. *Alexandratos N., Bruinsma J.* World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision // *ESA Working Paper No. 12–03.* FAO, 2012. P. 1–18.
 5. *Angle S.J., Singh U., Dimkpa C.O., Bindraban P.S., Hel-lums D.T.* Role of fertilizers for climate–resilient agriculture // *Proc. Inter. Fertil. Soc.* 2017. V. 802. P. 1–44.
 6. IFA market intelligence service. World outlook for fertilizer demand, nitrogen, phosphates and potash from 2021 to 2022. Public Summary, IFA Strategic Forum, 15–17 November, 2021. P. 1–6.
 7. *Cross L., Gruère A.* Public summary – world outlook for fertilizer demand, nitrogen, phosphates and potash from 2022 to 2023 // IFA Strategic Forum, Washington DC, 31 October–2nd November 2022. P. 1–13.
 8. Рынок минеральных удобрений: азотные удобрения. Итоги 2021 // ID–Marketing Исследовательская компания: [сайт]. 2008–2023. URL: id-marketing.ru (дата обращения: 20.05.2023).
 9. *Муравин Э.А., Ромодина Л.В., Литвинский В.А.* Агрохимия: учебник для студ. учрежд. высш. обр-я. М.: Изд. центр “Академия”, 2013. 304 с.
 10. *Малявин А.С., Миносьянк С.В., Аксенчик К.В., Лапушкин В.М.* Производство минеральных удобрений // *Энциклопедия технологий 2.0: Химический комплекс.* М., СПб.: “Центр экол. пром. политики”, 2022. С. 11–88.
 11. *Sempeho S.I., Kim H.T., Mubofu E., Pogrebnoi A., Shao G., Hilonga A.* Encapsulated urea–kaolinite nanocomposite for controlled release fertilizer formulations // *J. Chem.* 2015. P. 1–17.
 12. *Meybeck A., Gitz V.* Greening the economy with climate–smart agriculture food. Vietnam, Hanoi: FAO, 2012. P. 1–52.
 13. *Gil-Ortiz R., Naranjo M.A., Navarro A.R., Mola-da M.C., Atares S., Garcia C., Vicente O.* New eco-friendly polymeric-coated urea fertilizers enhanced crop yield in wheat // *Agronomy.* 2020. № 10. P. 1–15.
 14. *Wei H., Chen Z., Xing Z., Zhou L., Liu Q., Zhang Z., Jiang Y., Hu Y., Zhu J., Cui P., Zhang H.* Effects of slow or controlled release fertilizer types and fertilization modes on yield and quality of rice // *J. Integrat. Agricult.* 2018. № 17(10). P. 2222–2234.
 15. *Trenkel M.E.* Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: An option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture. Paris: Inter. Fertil. Industry Associat. (IFA), 2010. 163 p.
 16. *Babar S.K., Hassani N.A., Rajpar I., Babar S.A., Shah Z.H., Khan I.* Comparison of conventional and encapsulated urea on growth and yield of wheat (*Triticum aestivum* L.) // *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM).* 2019. V. 6. P. 181–187.
 17. *Норов А.М., Пагалешкин Д.А., Федотов П.С., Соколов В.В., Кочетова И.М., Рыбин Е.А., Торшин С.П., Лапушкин В.М.* Пат. 2776275 С1, РФ, СПК С05G 3/40. Способ получения удобрений с замедленным и контролируемым высвобождением питательных веществ. № 2021126117, заявл. 02.09.2021, опубл. 15.07.2022.

Effectiveness of Long-Acting Urea in the Growing of Spring Wheat

V. M. Lapushkin^{a,b,#}, M. A. Volkova^{a,b}, A. A. Lapushkina^{a,b}, S. P. Torshin^a, F. G. Igraliev^a, A. M. Norov^c, D. A. Pagaleshkin^c, P. S. Fedotov^c, V. V. Sokolov^c, I. M. Kochetova^c, E. A. Rybin^c

^aRussian State Agrarian University–Moscow Timiryazev Agricultural Academy, ul. Timiryazevskaya 49, Moscow 127434, Russia

^bPryanishnikov All-Russian Research Institute of Agrochemistry, ul. Pryanishnikova 31a, Moscow 127434, Russia

^cSamoilov Research Institute for Fertilizers and Insectofungicides Nord highway 75, Vologda region, Cherepovez 162622, Russia

[#]E-mail: lapushkin@rgau-msha.ru

The results of a series of vegetation experiments are presented, in which the effect of urea coated with calcium dihydrogen phosphate granules on the formation of a spring wheat crop was studied. It was shown that encapsulated urea, in comparison with its usual form, provided an increase in the yield of spring wheat grain by 9–13%. The coating of urea granules with calcium dihydrogen phosphate contributed to a more uniform release of fertilizer nitrogen, increasing the efficiency of its use by plants by 10–13%. It was found that the effectiveness of encapsulated urea is directly dependent on the thickness of the coating granules.

Keywords: nitrogen fertilizers, prolonged-acting urea, encapsulated urea, calcium dihydrogen phosphate, spring wheat, yield.

УДК 631.415:631.821:631.6:631.445.24

ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ ОТСЕВА ДОЛОМИТА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО ДЛЯ МЕЛИОРАЦИИ КИСЛЫХ ПОЧВ. ЭМПИРИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ПОДКИСЛЕНИЯ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ЛЕГКОСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ (ПО ДАННЫМ ПОЛЕВОГО ОПЫТА)

© 2024 г. А. В. Литвинович^{1,2,*}, А. В. Лаврищев², А. О. Ковлева^{1,2},
Ю. В. Хомяков¹, В. И. Дубовицкая¹, В. М. Буре^{1,3}

¹Агрофизический научно-исследовательский институт
195220 С.-Петербург–Пушкин, Гражданский просп., 14, Россия

²Санкт-Петербургский государственный аграрный университет
196601 С.-Петербург–Пушкин, Петербургское шоссе, 2, Россия

³Санкт-Петербургский государственный университет
199034 С.-Петербург, Университетская наб., 7–9, Россия

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

В длительном 10-вариантном микрополевым опыте, заложенном на среднекислой дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, проведено сравнительное изучение мелиоративных свойств отсева доломитовой крошки, складированной в отвалах, без разделения на фракции (ЕСМ), частиц размером 5–7 и 7–10 мм и доломитовой муки (ДМ), приготовленной из отсева доломита при просеивании доломитовой крошки с диаметром отверстий 0/25 мм. Эксперимент продолжается 14 опыто-лет. Выявлено, что частицы доломита размером 5–7 и 7–10 мм являются ценным известковым материалом. Их применение приводит к нейтрализации почвенной кислотности уже в год известкования. Чем выше доза применения, тем мелиоративный эффект больше. Существенных различий влияния гранул размером 5–7 и 7–10 мм, внесенных в эквивалентных дозах, на величину рН не выявлено. Положительное влияние известкования мелиорантом в количестве 3 и 5 доз H_t не заканчивалось спустя 14 опыто-лет после мелиорации и позволило отодвинуть срок проведения повторного (поддерживающего) известкования. Положительный эффект от применения естественной смеси фракций мела (ЕСМ) в научно обоснованной дозе уступал доломитовой муке. Проведена кластеризация отдельных вариантов опыта по их влиянию на величину рН_{KCl} за весь период эксперимента. Разработаны линейные тренды усредненных зависимостей процесса подкисления для частиц мелиоранта различного размера на всем промежутке времени опыта. Рассмотрены механизмы взаимодействия доломитовых частиц с почвой в процессе мелиорации.

Ключевые слова: частицы отсева доломита, мелиорация кислых почв, эмпирические модели, процесса подкисления, дерново-подзолистая легкосуглинистая почва, полевой опыт.

DOI: 10.31857/S0002188124040057, **EDN:** dlwzlu

ВВЕДЕНИЕ

В 2015 г. в лаборатории мелиорации почв АФИ заложен микрополевым опыт, направленный на установление возможности использования крупных частиц отсева доломитовой крошки, складированной в отвалах, в качестве мелиоранта пролонгированного действия.

Предметом изучения явились частицы доломита размером 5–7 и 7–10 мм, используемые в заведомо завышенных дозах. Теоретической предпосылкой подобного рода исследований являлся известный факт, что при использовании крупных частиц мелиоранта

в высоких дозах и увеличении суммы поверхности их частиц влияние тонины помола нивелируется [1].

В работах [2, 3] доказана возможность растворения доломита крупного размера при компостировании с кислой дерново-подзолистой почвой. Выявлена роль корневых выделений растений пшеницы и ячменя при разложении мелиоранта [4]. Получены данные о влиянии крупных фракций отсева щебеночного производства на общее содержание и водорастворимые формы гумуса [5, 6]. Настоящая статья является продолжением исследований, начатых в работе [7].

Цель работы – в длительном 10-вариантном опыте продолжительностью 14 лет провести сравнительное изучение мелиоративных свойств доломитовой крошки без разделения на фракции, частиц размером 5–7 и 7–10 мм и доломитовой муки, приготовленной из отсева доломита при просеивании смеси фракций через сито с диаметром отверстий 0.25 мм.

В задачи исследований входило: установить динамику величины pH_{KCl} при мелиорации дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы частицами доломитовой крошки; разработать эмпирические модели изменения величины pH_{KCl} в отдельных вариантах опыта; провести кластеризацию вариантов опыта, произвесткованных доломитом, по их влиянию на показатель pH_{KCl} за весь период эксперимента.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом настоящего изучения служили частицы доломита размером 5–7, 7–10 мм, естественная смесь фракций и доломитовая мука (<0.25 мм), приготовленная из частиц доломита. На долю фракций размером 5–7 и 7–10 мм в составе отсева приходилось по 11%. Содержание $CaCO_3$ в отсеве – 46.1, $MgCO_3$ – 38.4%.

Для выполнения поставленной цели был заложен 10-вариантный микрополевой опыт 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 (25 см). По периметру делянок размещали полиэтиленовую пленку. Внутри полученного таким образом сосуда размещали предварительно произвесткованную и удобренную дерново-подзолистую почву (*umbric albeluvisol abruptic*). На момент закладки опыта почва характеризовалась следующими показателями: pH_{KCl} 4.6, H_T – 4.9 ммоль(экв)/100 г почвы, гумус – 2.16%, содержание частиц <0.01 мм – 21.4%, повторность опыта четырехкратная. В качестве вариантов сравнения использовали делянки, удобренные одними минеральными удобрениями (фон) и вариант опыта фон + доломитовая мука. Доломитовую муку готовили из отсева доломита, пропуская частицы мелиоранта через сито с отверстиями 0.25 мм.

В опыте возделывали культуры, отзывчивые на известкование и характеризующиеся высокой потребностью в кальции и магнии, как элементах питания. Чередование культур: горох–горчица. В 2015 г. выращивали горох, в 2016–2022 гг. – горчицу и горох. Уборку растений проводили в фазе цветения. Удобрения применяли ежегодно. Перед закладкой опыта вносили 60 г д.в. азофоски ($NPK = 16 : 16 : 16$). На 2–14-е сроки возделывания растений под горох применяли азофоску 30 г/сосуд, под горчицу – 18 г/сосуд. Образцы почв для определения pH_{KCl} отбирали ежегодно после

уборки каждого урожая растений. Математическую обработку данных проводили по [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Величина pH_{KCl} является универсальным почвенным показателем, отражающим разнообразие свойств почв и химические почвенные процессы. Определение pH_{KCl} относится к числу обязательных анализов при изучении агрохимических показателей и совершенно необходимо для суждения о динамике изменения кислотно–основных свойств мелиорируемых почв (табл. 1).

Почва, выбранная для исследования, характеризовалась величиной pH_{KCl} , равной 4.6. Возделывание гороха в варианте без известкования не повлияло на величину почвенной кислотности. Показатель pH_{KCl} спустя год после известкования остался без изменений.

Возрастание почвенной кислотности в варианте с использованием одних минеральных удобрений зафиксировано спустя 2 опыто-года. После уборки горчицы pH_{KCl} снизился до 4.1 ед. и на протяжении последующих 9 опыто-лет оставался в области сильно-кислых величин. На 11-й опыто-год величина pH_{KCl} уменьшилась до 3.8 ед. и в дальнейшем, до 14 опыто-года сохранялась в интервале очень сильно-кислых величин (3.68–3.80 ед. pH). Следовательно, известкованная почва не находилась в равновесии. За период проведения эксперимента она постепенно подкислялась, неуклонно деградируя.

Основными причинами подкисления являются вынос оснований урожаем горчицы и гороха и потери за счет вымывания атмосферными осадками. Согласно литературным данным, ежегодный вынос кальция горохом может достигать 60–80 кг/га, горчицей – 300–500 кг/га в пересчете на $CaCO_3$ [9]. Ежегодные потери с фильтрующейся влагой атмосферных осадков составляют в среднем 400 кг/га.

Модель (1) динамики подкисления почвы за 14 вегетационных периодов в варианте опыта без известкования приведена в табл. 2. Модель статистически значима на высоком уровне значимости.

Использование доломитовой муки в дозе 1 H_T привело к устранению почвенной кислотности уже в год известкования. После уборки гороха величина pH_{KCl} составила 5.7 ед. Далее, до уборки горчицы на 8-й год опыта изменения pH_{KCl} укладывались в интервал величин, близких к нейтральному (5.85–5.55 ед.). Следовательно, в варианте с применением доломитовой муки в научно обоснованной дозе на протяжении 8 опыто-лет мелиоранту удавалось поддерживать величину pH_{KCl} почвы на достигнутом после известкования уровне.

Таблица 1. Динамика рН_{КС} дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы за 14 опыто-лет

Вариант	Годы														Сумма \bar{S}_i	Среднее \bar{S}_i
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
1. Контроль НРК (фон)	4.63	4.15	4.15	4.10	4.18	3.83	4.23	4.03	4.10	4.10	3.80	3.68	3.90	3.85	56.70	4.05
2. Фон + доломитовая мука 1 H_T	5.73	5.60	5.73	5.85	5.75	5.58	5.68	5.55	5.38	5.35	4.98	5.00	4.98	4.95	76.08	5.43
3. Фон + отсев щебня 5–7 мм 1 H_T	5.03	4.30	4.53	4.45	4.43	4.30	4.60	4.50	4.60	4.45	4.38	4.25	4.35	4.30	62.45	4.46
4. Фон + отсев щебня 5–7 мм 3 H_T	5.48	4.50	4.95	4.80	4.65	4.90	5.08	5.03	5.08	5.00	4.88	4.88	5.05	4.93	69.18	4.94
5. Фон + отсев щебня 5–7 мм 5 H_T	6.03	4.90	5.50	5.30	5.18	5.48	5.65	5.58	5.75	5.65	5.35	5.50	5.75	5.68	77.28	5.52
6. Фон + отсев щебня 7–10 мм 1 H_T	5.33	4.15	4.48	4.40	4.28	4.38	4.53	4.35	4.33	4.20	4.23	4.18	4.40	4.15	61.35	4.38
7. Фон + отсев щебня 7–10 мм 3 H_T	5.53	4.30	4.70	4.58	4.65	4.78	4.98	4.78	4.80	4.73	4.60	4.68	4.78	4.68	66.53	4.75
8. Фон + отсев щебня 7–10 мм 5 H_T	6.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.2	5.4	5.3	5.3	5.4	5.1	5.2	5.5	5.4	73.5	5.3
9. Фон + отсев щебня смесь фракций 1 H_T	5.68	5.43	5.13	5.00	4.95	5.08	5.15	4.98	5.05	4.90	4.63	4.68	4.88	4.88	70.38	5.03
10. Фон + отсев щебня естественная смесь фракций 3 H_T	6.3	4.5	6.1	5.9	5.9	6.4	6.2	6.3	6.2	6.2	5.9	5.9	6.1	6.2	83.9	6.0

Таблица 2. Эмпирические модели динамики подкисления дерново-подзолистой почвы

Вариант, №	Эмпирическая модель	<i>p</i> -value	<i>R</i> ²	Значимость модели
1	$y_{1,1} = 4.36 - 0.04 \cdot t$	0.002	0.547	Значима
2	$y_{2,1} = 5.97 - 0.07 \cdot t$	1.12 - 05	0.811	
3	$y_{3,1} = 4.64 - 0.024 \cdot t$	0.06	0.26	
4	$y_{4,1} = 4.93 + 0.002 \cdot t$	0.892	0.0015	Не значима
5	$y_{5,1} = 5.38 + 0.018 \cdot t$	0.34	0.074	
6	$y_{6,1} = 4.66 - 0.038 \cdot t$	0.05	0.283	Значима
7	$y_{7,1} = 4.8 - 0.012 \cdot t$	0.5	0.037	Не значима
8	$y_{8,1} = 5.2 + 0.006 \cdot t$	0.75	0.0087	
9	$y_{9,1} = 5.42 - 0.05 \cdot t$	0.0006	0.637	Значима
10	$y_{10,1} = 5.73 + 0.034 \cdot t$	0.284	0.095	Не значима

На 9–10-й опыто-годы величина pH_{KCl} снизилась до 5.38–5.35 ед. В последующие годы до конца эксперимента pH_{KCl} менялся около величины, соответствующей 5.0 ед. pH . Согласно [10], почва варианта опыта с ДМ начинала нуждаться в повторном известковании.

Об этом же свидетельствовали урожайные данные. Выход зеленой массы растений гречихи спустя 14 опыто-лет эксперимента в варианте с внесением ДМ достоверно не отличался от варианта с применением одних минеральных удобрений (83 и 77 г/сосуд соответственно, неопубликованные данные).

Таким образом, по влиянию тонкоизмельченного доломита (ДМ) на почвенную кислотность можно выделить несколько периодов. Первый период, когда несмотря на начавшийся вынос оснований урожаем и просачивающейся влагой атмосферных осадков, кислотность почвы не повышалась, т.к. одновременно проходили процессы взаимодействия почвы с непрореагировавшими частицами мелиоранта, и количество оснований в почве пополнялось. В условиях проведенного опыта этот период составил 8 опыто-лет. Второй период – нарастающее подкисление почвы за счет выноса оснований растениями и вымывание их влагой за счет атмосферных осадков в нижележащие слои почвенного профиля. Основываясь на экспериментальных данных проведенного исследования, можно говорить о втором периоде нарастающего подкисления почвы, начавшегося после уборки 9-го урожая растений и не заканчивающегося спустя 14 опыто-лет эксперимента.

Эмпирическая модель (2) динамики изменения величины pH_{KCl} в варианте опыта с ДМ статистически значима на очень высоком уровне значимости (табл. 2). В дальнейшем почва варианта с доломитовой мукой без повторного (поддерживающего) известкования вернется к своему исходному состоянию до закладки опыта.

Использование в качестве мелиоранта частиц отсева щебня размером 5–7 мм в дозе, рассчитанной по 1 H_r , привело в год известкования к снижению почвенной кислотности. Величины pH_{KCl} возросли с 4.6 до 5.0 ед. После уборки 2-го урожая растений в год последствий pH_{KCl} снизился до 4.3 ед. Далее, во всем промежутке времени изменения величины pH_{KCl} укладывались в диапазон от 4.60 до 4.25 ед., т.е. были равны, или ниже, чем до закладки опыта.

Следует при этом подчеркнуть, что величина pH_{KCl} в варианте с отсевом доломита размером 5–7 мм, внесенного в дозе 1 H_r , во всем промежутке времени опыта была более высокой, чем в почве не известкованного контроля. Следовательно, фракция отсева доломита размером 5–7 мм, использованная в научно обоснованной дозе, оказывала хотя и слабое, но положительное влияние на величину почвенной кислотности.

Модель (3) динамики подкисления почвы в варианте с применением доломита размером 5–7 мм в дозе 1 H_r статистически значима (табл. 2). В среднем убывание величины pH_{KCl} происходило во всем промежутке времени эксперимента. График модели приведен на рис. 1а.

Увеличение дозы внесения частиц доломита размером 5–7 мм до 3-х полных доз, рассчитанных по величине H_r , привело к усилению мелиоративного эффекта. Спустя год после известкования и уборки урожая гороха величина pH_{KCl} составила 5.48 ед. и несколько уступала варианту с ДМ (pH_{KCl} 5.73). В год последствий показатель pH_{KCl} почвы снизился до 4.5 ед. и далее до конца эксперимента изменялся от 4.65 до 5.08 ед. pH . Возврата к исходной величине pH_{KCl} почвы до закладки опыта не произошло.

Модель (4), описывающая изменение pH_{KCl} в варианте с частицами доломита размером 5–7 мм в дозе 3 H_r в течение 14 опыто-лет, статистически не значима (табл. 2). Статистически значимых изменений pH_{KCl} во всем промежутке времени эксперимента не выявлено. График модели приведен на рис. 1а.

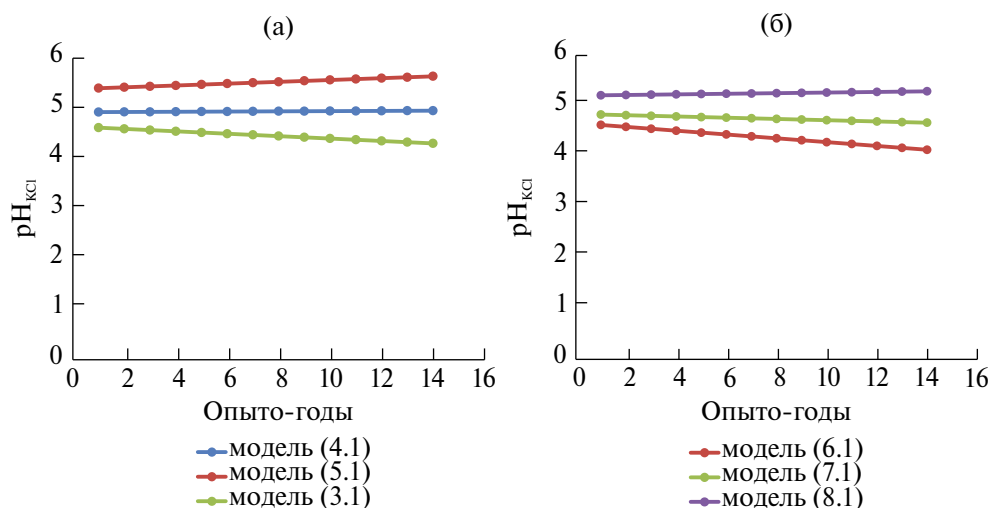


Рис. 1. Эмпирические модели динамики величины рН при использовании возрастающих доз фракций доломита размером: (а) – 5–7, (б) – 7–10 мм.

Следовательно, при применении частиц доломита в количестве, соответствующем $3 H_r$, удалось поддерживать показатель pH_{KCl} в средне-слабокислом интервале.

Максимальный мелиоративный эффект от использования частиц доломита размером 5–7 мм достигнут в варианте с внесением 5-ти полных доз, рассчитанных по H_r . В год известкования зафиксирован максимальный сдвиг pH_{KCl} – 6.03 ед. В год последствия pH_{KCl} снизился до 4.90 ед. рН. Начиная с 3-го года эксперимента и до уборки 14-го урожая растений изменения составили от 5.18 до 5.75 ед. рН. Таким образом, при внесении частиц отсева в дозе $5 H_r$, несмотря на некоторую (и неизбежную) вариабельность данных, мелиоранту удалось поддерживать величину pH_{KCl} на уровне, близком к нейтральному диапазону. Модель (5), описывающая изменение pH_{KCl} в вариантах, мелиорированных частицами доломита размером 5–7 мм в дозе $5 H_r$, статистически не значима. График модели приведен на рис. 1а.

В целом, проведенное исследование показало, что частицы отсева доломита размером 5–7 мм не являются “балластом”. Попав в почву, они постепенно растворяются, оказывая положительное влияние на почвенную кислотность. Влияние степени измельчения мелиоранта при увеличении дозы применения крупных частиц доломита нивелируется. Чем больше доза внесения, тем мелиоративный эффект сильнее.

Графики моделей, описывающие динамику величины pH_{KCl} в вариантах с применением возрастающих доз доломита размером 5–7 мм нигде не пересекаются (рис. 1а).

Влияние частиц доломитовой крошки размером 7–10 мм на величину рН в год известкования мало отличалось от частиц размером 5–7 мм. Мелиоративный

эффект от применения этих фракций в равных дозах был одинаков. На 2–14-й опыто-годы эксперимента отмечено некоторое (незначительное) преимущество фракций 5–7 мм по сравнению с частицами 7–10 мм. Эмпирические модели (6), (7), (8) динамики изменения величины pH_{KCl} при возрастании дозы применения частиц доломита размером 7–10 мм в дозах 1, 3, $5 H_r$ приведены в табл. 2.

Модель (6), описывающая динамику изменения величины pH_{KCl} в варианте опыта с использованием частиц отсева размером 7–10 мм в дозе $1 H_r$, статистически значима. Происходило значимое изменение величины рН во всем промежутке времени эксперимента. График модели приведен на рис. 1б.

Модели (7) и (8) в вариантах опыта, известкованных повышенными лозами частиц доломита (3 и $5 H_r$), статистически не значимы (табл. 2). Графики моделей, приведенные на рис. 1б, нигде не пересекаются. Эмпирические модели, описывающие динамику величины pH_{KCl} в вариантах опыта с применением в равных дозах (3 и $5 H_r$) частиц доломита размером 5–7 и 7–10 мм обладают несомненным сходством и мало отличаются между собой.

В целом показано, что частицы доломита размером 5–7 и 7–10 мм являются ценным известковым материалом. При применении частиц доломита размером 5–7 и 7–10 мм в дозе $1 H_r$ отмечено постепенное подкисление почвы на всем промежутке эксперимента. Напротив, применение этих же частиц в количестве, превышающем в 3 и 5 раз научно обоснованную дозу, является приемом, позволяющим длительное время поддерживать почвенную кислотность на постоянном уровне. Чем выше доза применения, тем больше мелиоративный эффект на всем интервале изучения.

Следует подчеркнуть, что после уборки 14-го урожая растений в почве известкованных сосудов осталось значительное количество частиц неразложившегося доломита. Следовательно, можно ожидать дальнейшего длительного последствия данных частиц. Таким образом, частицы отсева доломита, размером 5–7 и 7–10 мм, внесенные в почву в заведомо завышенных дозах, можно рассматривать как мелиоранты пролонгированного действия.

Необходимо указать, что динамика изменения величины pH_{KCl} в вариантах, мелиорированных крупными частицами доломита, существенно отличалась от динамики изменения почвенной кислотности в варианте с доломитовой мукой. Это можно объяснить следующим образом. Согласно современным представлениям, взаимодействие известковых материалов с почвой происходит при участии 2-х механизмов: 1 – за счет постепенного перехода оснований в почвенный раствор с последующей реакцией с почвенно-поглощающим комплексом. Этот механизм полностью соответствует растворению в почве ДМ; 2 – за счет контактного обмена поверхности частиц мелиоранта и почвы. В процессе обмена не участвуют внутренние слои гранул [9].

Динамика изменения величины pH_{KCl} в вариантах применения частиц 5–7 и 7–10 мм вне зависимости от дозы внесения носила сходный характер и подчинялась следующей закономерности: резкий рост величины pH спустя один опытно-год после закладки опыта, после уборки 2-го урожая растений величина pH_{KCl} почвы снижалась. Подобная динамика объясняется следующим образом. Находящийся в отвалах доломит подвергался физическому разрушению (шли процессы выветривания поверхности гранул). В процессе выветривания происходило разрушение кристаллизационных структурных связей между молекулами карбонатов. Внешний слой приобретал определенную рыхлость и при попадании в почву быстро растворялся. В год применения крупных частиц наблюдали резкое увеличение величины pH почвы. Далее растворение замедлялось, поскольку расположенные под выветрелым слоем внутренние слои имели более прочное сложение. Разложение проходило по 2-му типу. При этом растения способны поглощать катионы из локальных очагов почвы, прилегающих к поверхности мелиоранта [9].

Использование естественной смеси мелиорантов в дозе, соответствующей $1 H_r$, также привело к снижению почвенной кислотности. После уборки первого урожая растений показатель pH_{KCl} не отличался от такового, установленного в варианте с ДМ. В дальнейшем, несмотря на некоторые (незначительные) изменения, величина pH_{KCl} постепенно снижалась и спустя 14 опытно-лет составила 4.88 ед., т.е. укладывалась в среднекислый диапазон и была выше, чем в почве до закладки эксперимента. Мелиоративный эффект

во всем промежутке времени опыта уступал ДМ, примененной в эквивалентной дозе.

Модель (9), описывающая динамику подкисления почвы в варианте, мелиорированном ЕСМ в дозе $1 H_r$, статистически значима на высоком уровне значимости. Имеются статистически значимые показатели подкисления почвы во всем промежутке времени опыта (табл. 2).

Увеличение дозы ЕСМ до количества, соответствующего $3 H_r$, усилило эффект от применения. На момент завершения эксперимента величина pH_{KCl} соответствовала величине, установленной спустя 1 год после известкования. Модель (10) динамики величины pH в варианте с ЕСМ по $3 H_r$ приведена в табл. 2. Во всем промежутке наблюдений нет статистически значимого изменения показателя pH .

Таким образом, применение ЕСМ в количестве, превышающем в 3 раза научно обоснованную дозу внесения в течение 14 опытно-лет, позволило поддерживать почвенную кислотность на уровне, близкому к нейтральному. Тем не менее, при использовании естественной смеси частиц доломита в качестве известкового материала не следует применять дозы, превышающие количество, рассчитанное по $1 H_r$. Это связано с усилением непроизводительных потерь Са и Mg в результате миграции. В работе [11] показано, что элювиальные потери оснований из варианта с применением смеси фракций в дозе $3 H_r$ превосходили потери оснований при внесении в почву ДМ в научно обоснованной дозе ($1 H_r$). Следовательно, использование отсева доломита в высоких дозах без разделения на фракции не эффективно.

Одной из задач математической обработки данных опыта являлось проведение кластеризации (группировки отдельных вариантов опыта по величине мелиоративного эффекта, полученного в результате известкования).

Показано, что эмпирические модели (1.1), (6.1), (9.1) в вариантах опыта 1, 6, 9 обладали высокой статистической значимостью. В этих вариантах опыта имелись статистически значимые изменения pH (в среднем происходило уменьшение pH). Выявлено несомненное сходство моделей (1.1), (6.1), (9.1) в вариантах опыта 1, 6, 9. Коэффициенты моделей были близки по своим характеристикам, динамика в этих вариантах опыта очень похожа (происходило статистически значимое подкисление почвы).

Эмпирические модели (2.1), (3.1) в вариантах опыта 2, 3 также обладали высокой статистической значимостью, в вариантах опыта 2, 3 в среднем происходили статистически значимые изменения pH (происходило уменьшение величины pH). Модели (2.1), (3.1) сходны между собой, но при этом отличаются от моделей (1.1), (6.1), (9.1).

Эмпирические модели (4.1), (5.1), (7.1), (8.1), (10.1) обладали несомненным сходством и статистически были незначимы. В вариантах опыта 4, 5, 7, 8, 10 в среднем не было статистически значимых изменений рН на всем промежутке времени наблюдений.

На основе сходства свойств эмпирических моделей можно выделить следующие группы опытов (кластеризация № 1): I группа содержит варианты опытов 1, 6, 9; II группа содержит варианты опытов 2 и 3; III группа содержит варианты опыта 4, 5, 7, 8, 10.

Кластеризация № 2 предусматривает рассмотрение суммы рН в каждом варианте опыта по опыто-годам (табл. 1):

$$S_1 = 56.7; S_2 = 76.075; S_3 = 62.45; S_4 = 69.175;$$

$$S_5 = 77.275; S_6 = 61.35; S_7 = 66.525; S_8 = 73.525;$$

$$S_9 = 70.375; S_{10} = 83.85$$

$$S_1 < S_6 < S_3 < S_7 < S_4 < S_9 < S_8 < S_2 < S_5 < S_{10}$$

На основе величин сумм рН возможна следующая кластеризация № 2: I группа содержит варианты опыта 1, 3, 6; II группа содержит варианты опыта 4, 7, 9; III группа содержит варианты опыта 2, 5, 8, 10.

Кластеризация № 3 учитывает распределение вариантов опыта в кластеризации № 1 и 2: I группа содержит варианты опыта 1, 6; II группа содержит вариант опыта 3; III группа содержит вариант опыта 9; IV группа содержит варианты опыта 4, 7; V группа содержит вариант опыта 2; VI группа содержит варианты опыта 5, 8, 10.

Исходя из кластеризации № 3, можно сделать вывод о несомненном сходстве вариантов 4 и 7, а также сходстве вариантов опыта 5 и 8.

Проведенная группировка позволяет сделать важный в практическом отношении вывод: мелиоративный эффект, полученный в вариантах опыта, произвесткованных частицами доломита размером 5–7 и 7–10 мм в равных дозах (3 и 5 H_T) практически не отличались друг от друга. Таким образом, разделение этих фракций при использовании для известкования кислых почв не целесообразно.

ВЫВОДЫ

1. Таким образом, в условиях 10-вариантного микрополевого опыта проведены наблюдения за динамикой величины рН_{KCl} в течение 14 опыто-лет. Показано, что не известкованная почва не находится в равновесии. За период проведения эксперимента она постепенно подкислялась.
2. Использование доломитовой муки (ДМ), приготовленной из отсева щебня в дозе 1 H_T , привело к устранению почвенной кислотности уже в год известкования. На протяжении 8 опыто-лет мелиоранту удалось поддерживать показатель рН_{KCl} почвы на достигнутом в год известкования уровне.

В дальнейшем отмечено постепенное снижение рН_{KCl}. Спустя 10 опыто-лет почва начинала нуждаться в поддерживающем известковании.

3. В течение 14 опыто-лет эксперимента частицы доломита размером 5–7 и 7–10 мм, внесенные в дозе 1 H_T , оказывали хотя и слабое, но положительное влияние на величину рН_{KCl}. Уменьшение величины рН отмечено в среднем на всем протяжении эксперимента.
4. Рост количества частиц доломита размером 5–7 и 7–10 мм до 3 полных доз, рассчитанных по H_T , привел к усилению мелиоративного эффекта. На протяжении 14 опыто-лет мелиорантам удалось поддерживать рН_{KCl} почвы в средне- и слабокислом диапазоне. Статистически значимых изменений величины рН во всем промежутке времени опыта не установлено.
5. При внесении в почву частиц доломита размером 5–7 и 7–10 мм в дозе 5 H_T мелиоративный эффект еще более усиливался. Мелиорантам удалось поддерживать величину рН на уровне, соответствующим слабокислому и близкому к нейтральному диапазону в течение всего периода эксперимента.
6. Внесение в почву частиц отсева доломита размером 5–7 и 7–10 мм в заведомо завышенных дозах можно рассматривать как прием, позволяющий длительное время поддерживать почвенную кислотность на постоянном уровне и отодвигать срок проведения повторного (поддерживающего) известкования.
7. Использование естественной смеси фракций мела (ЕСМ) в дозе, соответствующей 1 H_T , также привело к снижению почвенной кислотности. Мелиоративный эффект во время всего эксперимента уступал ДМ, примененной в эквивалентной дозе. При использовании ЕСМ в дозах, превышающих 1 H_T , непроизводительные потери кальция и магния в результате миграции усиливались.
8. Проведена кластеризация отдельных вариантов опыта по их влиянию на величину рН_{KCl} за весь период эксперимента. Разработаны линейные тренды усредненных зависимостей процесса подкисления для частиц мелиоранта различного размера во всем промежутке времени опыта. Рассмотрены механизмы взаимодействия доломитовых частиц с почвой в процессе мелиорации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литвинович А.В., Небольсина З.П. Продолжительность действия известковых мелиорантов в почвах и эффективность известкования // Агрохимия. 2012. № 10. С. 79–94.
2. Павлова О.Ю., Берсенева А.О., Литвинович А.В., Лаврицев А.В., Салаев И.В., Буре В.М. Исследования

- ние скорости растворения крупных частиц доломита в кислой дерново-подзолистой супесчаной почве по данным лабораторного опыта // *Агрофизика*. 2020. № 3. С. 23–28.
<https://doi.org/10.25695/AGRPH.2020.03.04>
3. *Литвинович А.В., Берсенева А.О., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М.* Процесс разложения крупных частиц доломита в сильнокислой дерново-подзолистой супесчаной почве. Динамика убыли массы доломита на разных стадиях растворения (по данным лабораторного опыта) // *Агрохимия*. 2022. № 3. С. 52–60.
 4. *Litvinovich A., Lavrishchev A., Bure V., Kekilbayeva G., Saljnikov E.* Impact of dolomite rock waste on soil acidity and absorption of Ca and Mg by barley and wheat // *Ciencia e Agrotecnologiathis link is disabled*. 2023. V. 47. e006622.
 5. *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.
 6. *Шевченко Е.Е., Литвинович А.В., Макаренко В.В.* Влияние возрастающих доз крупных фракций отсева доломита на общее содержание и водорастворимые формы гумуса мелиорируемой дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы // *Агрофизика*. 2017. № 4. С. 25–37.
 7. *Litvinovich A., Pavlova O., Lavrishchev A., Bure V.M., Saljnikov E.* Dynamics of soil pH after utilization of by-products of industrial rock processing as a calcareous material in acid soils // *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2021. V. 52. № 2. С. 93–101.
 8. *Буре В.М.* Методология статистического анализа опытных данных. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. 141 с.
 9. *Небольсин А.Н., Небольсина З.П.* Известкование почв. СПб., 2010. 254 с.
 10. *Небольсин А.Н.* Теоретическое обоснование известкования почв Северо-Запада Нечерноземной зоны РСФСР: Дис. ... д-ра с.-х. наук. СПбГАУ, 1983. 509 с.
 11. *Litvinovich A.V., Salaev I.V., Pavlova O. Yu., Lavrishchev A.V., Bure V.M., Saljnikov.* Utilization of large-sized dolomite by-product particles and losses of cations from acidic soil // *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2019. P. 869–877.
<https://doi.org/10.1080/00103624.2019.1589490>

Effectiveness and Duration of Action of Dolomite Screening Particles Used for Reclamation of Acidic Soils. Empirical Models of the Acidification Process of Sod-Podzolic Light Loamy Soil (according to Field Experience)

**V. Litvinovich^{a,b,#}, A. V. Lavrishchev^b, A. O. Kovlev^{a,b}, Yu. V. Khomyakov^a,
 V. I. Dubovitskaya^a, V. M. Bure^{a,c}**

^a*Agrophysical Research Institute,
 Grazhdansky prosp. 14, St. Petersburg–Pushkin 195220, Russia*

^b*St. Petersburg State Agrarian University,
 Peterburgskoe shosse 2, St. Petersburg–Pushkin 196601, Russia*

^c*St. Petersburg State University,
 Universitetskaya nab. 7–9, St. Petersburg 199034, Russia*

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

In a long-term 10-variant microfield experiment based on a medium-acidic sod-podzolic light loamy soil, a comparative study of the reclamation properties of the screening of dolomite crumbs stored in dumps, without separation into fractions (SIF), particles of 5–7 and 7–10 mm in size and dolomite flour (DF) prepared from the screening of dolomite when sifting dolomite crumbs with the diameter of the holes is 0/25 mm. The experiment lasts for 14 experimental years. It has been revealed that dolomite particles of 5–7 and 7–10 mm in size are valuable calcareous material. Their use leads to the neutralization of soil acidity already in the year of liming. The higher the dose of application, the greater the reclamation effect. There were no significant differences in the effect of granules of 5–7 and 7–10 mm in size, applied in equivalent doses, on the pH value. The positive effect of liming with meliorant in the amount of 3 and 5 doses of hydrolytic acidity (Ah) did not end after 14 experimental years after reclamation and allowed to postpone the period of repeated (maintenance) liming. The positive effect of using a natural mixture of chalk fractions (SIF) in a scientifically justified dose was inferior to dolomite flour. Clustering of individual variants of the experiment was carried out according to their effect on the pH_{KCl} value for the entire period of the experiment. Linear trends of the averaged dependencies of the acidification process for meliorant particles of various sizes over the entire period of the experiment have been developed. The mechanisms of interaction of dolomite particles with soil in the process of land reclamation are considered.

Keywords: dolomite sifting particles, acidic soil reclamation, empirical models, acidification process, sod-podzolic light loamy soil, field experience.

УДК 633.16:581.132:581.134

ВЛИЯНИЕ НЕКОРНЕВЫХ ПОДКОРМОК ОРГАНО-МИНЕРАЛЬНЫМИ УДОБРЕНИЯМИ НА СОДЕРЖАНИЕ ХЛОРОФИЛЛА В ЛИСТЬЯХ ЯЧМЕНЯ И ЕГО СВЯЗЬ С ПОКАЗАТЕЛЯМИ КАЧЕСТВА ЗЕРНА

© 2024 г. Е. Н. Носкова¹, Е. М. Лисицын^{1,*}¹Федеральный аграрный научный центр Северо-Востока им. Н.В. Рудницкого
610007 Киров, ул. Ленина, 166а, Россия

*E-mail: edaphic@mail.ru

В Кировской обл. РФ в 2020–2022 гг. в полевом севообороте исследовано влияние внекорневой обработки органо-минеральным удобрением Полидон® Амино Старт и жидким минеральным удобрением КАС-28 в фазе кушения растений на состояние пигментного комплекса листьев ярового ячменя сортов Новичок, Родник Прикамья и Памяти Родины и его связь с показателями качества зерна. Выявлено значимое влияние внекорневых обработок на содержание пигментов в подфлаговом и флаговом листе. Применение внекорневой обработки КАС-28 усилило связь показателей качества зерна с содержанием хлорофилльных пигментов 2-х верхних листьев по сравнению с контрольным вариантом. Влияние препарата Амино Старт не было однозначным: часть связей несколько ослабла по сравнению с контролем, часть усилилась, некоторые стали статистически значимыми. Суммарное содержание хлорофилла коррелировало с содержанием в зерне клетчатки и жира во всех вариантах обработки. По сравнению с контролем применение внекорневых обработок изменяло эффективность использования фотоассимилятов обоих листьев для синтеза клетчатки и жира. Полученные данные указали на возможность прогноза формирования основных показателей качества зерна ярового ячменя по содержанию хлорофилльных пигментов во флаговом или подфлаговом листьях растений в фазе цветения.

Ключевые слова: пигменты, белок, крахмал, клетчатка, жир, корреляция, флаговый лист, подфлаговый лист.

DOI: 10.31857/S0002188124040062, EDN: dlwcmq

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Российской Федерации ячмень (*Hordeum vulgare* L.) занимает 2-е место по площади возделывания зерновых культур: в 2023 г., по данным Минсельхоза РФ, из 29 млн га посевов зерновых и зернобобовых культур на долю пшеницы пришлось 13.5 млн га (46.5%), на долю ячменя – 7 млн га (24.1%) (<https://zerno.ru/node/22254>). Что касается урожайности, то в 2022 г. в валовом сборе зерновых и зернобобовых культур в России (151.0 млн т) первое место также принадлежало пшенице (яровой и озимой) – 102.7 млн т, второе – ячменю (озимый – 3.2, яровой – 19.7 млн т) (<https://zerno.ru/node/21579>). Аналитики компании BusinessStat (<https://businessstat.ru/catalog/id8642/>) отмечали, что доля ячменя в структуре продаж зерновых в 2021 г. составила 16.9%. При этом в России 70% ячменя используют на кормовые цели – он содержит полноценный белок, богат крахмалом. Это соответствует общемировой

тенденции использования зерна ячменя: на кормовые цели применяют >75% зерна, на продовольственные – ≈15 и на пивоварение – 8% [1].

По данным [2], три основных химических компонента зерна (крахмал, клетчатка и сырой протеин) составляют более 90% его сухого вещества (соответственно 59.1–61.6, 18.2–21.5 и 11.7–13.64%). Практически все запасные питательные вещества зерна образуются за счет работы фотосинтетических пигментов листьев (хлорофиллов *a* и *b*); ведущую роль в этом играют 2 верхних листа. Известно, что флаговый лист зерновых культур обеспечивает от 50 до 60% ежедневного синтеза пластических веществ [3]. Считается, что флаговый лист является хорошим индикатором азотного статуса надземной массы растений на стадии GS65 [4], поэтому его роль в повышении урожая и качества зерна, в частности, в повышении содержания белка, в последние годы активно изучают и используют в селекции [5, 6]. Кроме того, большая часть азота зерна (от 60 до 95%) также происходит от ремобилизации

из верхних листьев [4], флаговый лист поставляет азот прямо в колос, при этом в течение периода налива зерна во флаговом листе происходит более чем 50%-ное снижение содержания азота [7].

Агрономическая практика азотного питания сельскохозяйственных растений последнего десятилетия заключается в переходе к дробному типу внесения азота – часть азотных удобрений вносятся при посеве, другую часть – в виде некорневых (листовых) подкормок в критических фазах потребления элемента [8]. Оценку влияния некорневых подкормок чаще всего ведут, применяя 2 основных показателя – уровень урожайности и содержание белка в зерне. Поэтому некорневая обработка азотсодержащими удобрениями в нужное время может до определенной степени улучшить накопление белка в зерне [9]. Прогноз содержания белка в зерне в последние годы осуществляют на основе анализа суммарного содержания хлорофилла во флаговом листе с помощью портативных измерителей типа SPAD-502 (Konica Minolta Sensing, Inc., Japan), или CCM-200 (Opti-Sciences, Inc., USA) [9, 10]. Однако, в настоящее время существуют только отдельные работы, в которых изучали возможность использования портативных хлорофиллометров (N-тестеров) для прогноза формирования других показателей качества, в состав которых азот не входит, но которые, тем не менее, образуются в результате активной работы фотосинтетического аппарата листьев. Например, для кукурузы были отмечены высокосвязанные корреляции между содержанием хлорофилла и содержанием масла ($r = 0.611$) в условиях засушливого сезона [11].

Однако внекорневая подкормка азотсодержащими удобрениями оказывает влияние и на содержание в зерне ячменя питательных веществ, ценных с точки зрения кормления животных, таких как крахмал, сырая клетчатка и жир. В нашей предыдущей работе [12] показано, как в условиях Волго-Вятского региона можно корректировать содержание в зерне ячменя таких ценных, с точки зрения кормления животных, компонентов как жир, белок, клетчатка и крахмал с помощью некорневых обработок азотсодержащими удобрениями в фазе кущения растений. Поэтому цель работы – оценка вариативности содержания хлорофиллов в 2-х верхних листьях растений ячменя при некорневой обработке азотсодержащими удобрениями и выявление степени взаимосвязи содержания хлорофиллов a и b в листьях и параметров качества зерна при применении разных вариантов некорневой обработки растений.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Опыты проведены в 2020–2022 гг. в полевом севообороте отдела агрохимии и земледелия ФАНЦ Северо-Востока (г. Киров, РФ). Почва опытного участка – дерново-подзолистая среднесуглинистая, сформированная на элювии пермских глин. Агрохимические показатели почвы пахотного слоя опытного участка: pH_{KCl} 4.59–5.00 ед., содержание подвижного фосфора – 148–157, подвижного калия – 127–140 мг/кг почвы, гумуса – 1.74–2.00%. Площадь делянки – 10 м², повторность опыта четырехкратная, размещение делянок систематическое со смещением. Под предпосевную культивацию вносили минеральные удобрения NPKS (25 : 4 : 4 : 2) в дозе 0.3 т/га. Доза внесения предпосевного удобрения выбрана на основе предыдущих исследований [13], которые показали, что такое количество удобрений обеспечивает формирование урожайности зерна ячменя не менее 3.5–4.5 т/га. Объекты исследования – сорта ячменя: Новичок, Родник Прикамья и Памяти Родины. Все 3 сорта созданы в ФАНЦ Северо-Востока (селекционер – член-корреспондент РАН И.Н. Щенникова), зернофуражного направления использования, 2 последних сорта включены в список ценных по качеству сортов РФ.

В качестве органо-минерального азотсодержащего удобрения использовали препарат Полидон® Амино Старт производства компании “Полидон® Агро” (Москва). Это жидкое комплексное органо-минеральное удобрение нового поколения (на основе гуминовых и фульвовых кислот, ростовых веществ природного происхождения, микроэлементов, аминокислот и полисахаридов) российского производства широко используют в технологиях возделывания зерновых культур, озимого рапса, кукурузы, сои [14]. В состав удобрения Амино Старт входят: L-аминокислоты (200 г/л), азот ($N_{общ}$ – 130 г/л), фосфор (P_2O_5 –75 г/л), калий (K_2O – 25 г/л), магний (MgO – 15 г/л), железо (Fe – 6 г/л), марганец (Mn – 3 г/л), цинк (Zn – 3 г/л), медь (Cu – 3 г/л), бор (B – 3 г/л), молибден (Mo – 1 г/л), кобальт (Co – 0,05 г/л). Удобрение применяют для стимулирования роста корневой системы, повышения продуктивного кущения, усиления стрессоустойчивости растений, повышения урожайности.

Жидкое минеральное азотное удобрение “КАС-28” (карбамидо-аммиачная селитра) представляет собой жидкий раствор карбамида и аммиачной селитры. Это единственное азотное удобрение, содержащее нитратный, аммонийный, амидный азот и не содержащее свободного аммиака, что позволяет существенно снизить непроизводительные потери азота [15, 16]. Физиологическое действие удобрения на растения заключается

Таблица 1. Метеоусловия в период проведения опыта (метеостанция г. Киров)

Месяц	Средняя t, °С	Отклонение от нормы, °С	Количество осадков, мм	% от нормы	Сумма эффективных температур, °С
2020 г.					
Май	12.2	+0.9	89	154	226.6
Июнь	15.3	-1.2	41	47	535.0
Июль	20.5	+1.6	100	110	1016.0
Август	15.1	-0.5	61	73	1327.9
2021 г.					
Май	15.0	+3.1	58	107	320.4
Июнь	19.9	+3.5	63	78	767.3
Июль	19.2	+0.3	92	113	1207.2
Август	18.8	+2.9	38	51	1634.8
2022 г.					
Май	8.5	-3.4	53	99	143.9
Июнь	16.1	-0.3	118	145	475.4
Июль	20.0	+1.1	130	159	938.9
Август	20.0	+4.0	18	24	1402.1

в активации роста, когда надземная часть растения интенсивно развивается, закладываются цветочные почки – залог будущего урожая.

Схема опыта, варианты: 1 – контроль (без обработки вегетирующих растений минеральными и органо–минеральными удобрениями), 2 – листовая обработка Полидон® Амино Старт (1 л/га) в фазе кущения, 3 – листовая обработка КАС 28 (30 л/га) в фазе кущения.

Уборку урожая проводили комбайном Wintersteiger в фазе полной восковой спелости. Анализ физико-химических свойств зерна ячменя выполняли на приборе INFRAMATIC8620 производства Perten Instruments (Швеция) согласно методическим рекомендациям производителя. Оценивали содержание в зерне следующих компонентов: сырого протеина (белка), крахмала, сырой клетчатки и жира. Данные выражали в% от сухой массы зерна.

В мае, июне и первой половине июля 2020 г. отмечена неустойчивая по температуре погода, в 1-й декаде – сухая, во 2-й-3-й декаде – с небольшими, временами сильными, дождями, во 2-й половине июля – умеренно теплая, с частыми дождями, иногда сильными. Август был теплый и умеренно теплый, преимущественно сухой или с небольшими осадками. В целом сложившиеся метеоусловия вегетационного периода были благоприятными для возделывания ярового ячменя (табл. 1).

В мае 2021 г. преобладала теплая и жаркая, как с сухими, так и с дождливыми периодами, погода. В июне и июле погода была от умеренно теплой до жаркой, а также сухой с периодическими

дождями. Местами наблюдали почвенную засуху. Август – теплый и жаркий с локальными дождями. В целом, условия вегетации 2021 г. можно охарактеризовать как умеренно засушливые.

В мае 2022 г. отмечали неустойчивую погоду, было преимущественно холоднее обычного, с небольшими, значительными в отдельные дни осадками. Температура и осадки в июле способствовали формированию продуктивного колоса. В целом погодные условия, сложившиеся в 2022 г., были благоприятными для получения высокой урожайности ячменя.

В середине фазы цветения отбирали пробы флаговых и подфлаговых листьев для оценки содержания фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a* и *b* (**Chl a**, **Chl b**)). Для этого с 20-ти растений каждого сорта отбирали образцы 2-х верхних листьев, в лабораторных условиях выделяли пигменты по методике [17] 100%-ным ацетоном. Оценку содержания пигментов осуществляли на спектрофотометре UVmini-1240 (SHIMADZU Corporation, Japan) с использованием длин волн 644.8 и 661.6 нм. Концентрацию пигментов в вытяжках рассчитывали по формулам:

$$\begin{aligned} \text{концентрация Chl } a \text{ (мг/дм}^3\text{)} &= \\ &= 11.24 A_{661.6} - 2.04 A_{644.8}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{концентрация Chl } b \text{ (мг/дм}^3\text{)} &= \\ &= 20.13 A_{644.8} - 4.19 A_{661.6}, \end{aligned} \quad (2)$$

где *A* – оптическая плотность растворов при указанных длинах волн.

Статистическую обработку полученных данных проводили методами описательной статистики, корреляционного и дисперсионного анализов в табличном процессоре Microsoft Office Excel 2013 и пакете статистических программ Agros 2.05.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ полученных данных позволил заключить, что в каждый из 3-х лет исследования величины основных показателей качества зерна ярового ячменя, во всех вариантах опыта укладывались в пределы их содержания, известные из литературы: для белка – 9–13% [18, 19], клетчатки – 3–8% [20, 21], крахмала – 52–77% [22, 23], жира – 1–3% [24, 25] (табл. 2).

Ранее было показано [12], что доля влияния условий года выращивания на изменчивость представленных показателей изменялась от 79.5% для содержания белка до 95.6% – для содержания

жира. Исключением являлся показатель содержания крахмала в зерне, действие на него факторов “год выращивания” и “сорт” было статистически незначимым. Межсортные отличия по большинству показателей качества зерна в пределах одного года опыта также не были статистически значимыми. В то же время значимые различия для каждого из изученных параметров качества были отмечены в вариантах применения некорневой обработки для отдельных сортов в конкретные годы исследования.

Условия года вегетации также оказали основное влияние и на изменчивость содержания хлорофиллов в листьях исследованных сортов ячменя (табл. 3).

Согласно данным трехфакторного дисперсионного анализа, доля влияния фактора “год выращивания” на изменчивость содержания пигментов составила: для Chl *a* во флаговом листе – 79.4, в подфлаговом – 84.5%, для Chl *b* во флаговом листе – 60.0,

Таблица 2. Показатели качества зерна 3-х сортов ярового ячменя (2020–2022 гг.)

Сорт	Вариант	Белок, %	Клетчатка, %	Крахмал, %	Жир, %
2020 г.					
Новичок	Контроль	10.9 ± 0.1	3.49 ± 0.08	52.5 ± 0.3	1.82 ± 0.03
	КАС-28	10.9 ± 0.1	3.95 ± 0.21	53.6 ± 0.2	1.85 ± 0.03
	Амино Старт	10.8 ± 0.2	3.64 ± 0.15	53.9 ± 0.1	1.92 ± 0.06
Родник Прикамья	Контроль	12.0 ± 0.3	2.81 ± 0.18	48.5 ± 0.8	1.57 ± 0.03
	КАС-28	11.9 ± 0.4	3.21 ± 0.31	49.4 ± 0.4	1.58 ± 0.04
	Амино Старт	11.0 ± 0.4	2.81 ± 0.08	49.9 ± 0.5	1.37 ± 0.06
Памяти Родиной	Контроль	11.5 ± 0.2	3.45 ± 0.32	50.2 ± 0.2	1.42 ± 0.03
	КАС-28	11.6 ± 0.2	3.06 ± 0.08	50.6 ± 0.2	1.70 ± 0.02
	Амино Старт	13.1 ± 0.2	2.92 ± 0.04	47.7 ± 0.4	1.51 ± 0.02
2021 г.					
Новичок	Контроль	11.9 ± 0.2	5.36 ± 0.17	51.0 ± 0.7	2.43 ± 0.03
	КАС-28	11.4 ± 0.2	5.06 ± 0.28	50.7 ± 0.6	2.29 ± 0.04
	Амино Старт	11.6 ± 0.3	4.99 ± 0.11	51.0 ± 0.5	2.30 ± 0.05
Родник Прикамья	Контроль	10.8 ± 0.3	4.78 ± 0.13	50.8 ± 0.5	2.20 ± 0.04
	КАС-28	11.0 ± 0.3	4.73 ± 0.19	50.9 ± 1.1	2.15 ± 0.04
	Амино Старт	11.7 ± 0.6	4.63 ± 0.13	48.8 ± 1.2	2.16 ± 0.04
Памяти Родиной	Контроль	11.3 ± 0.5	4.83 ± 0.15	56.5 ± 1.3	2.16 ± 0.06
	КАС-28	11.7 ± 0.3	4.92 ± 0.13	49.1 ± 0.4	2.31 ± 0.08
	Амино Старт	12.5 ± 0.4	5.03 ± 0.32	48.5 ± 0.6	2.28 ± 0.08
2022 г.					
Новичок	Контроль	10.1 ± 0.5	5.21 ± 0.05	53.3 ± 0.5	2.93 ± 0.03
	КАС-28	9.66 ± 0.12	5.61 ± 0.32	53.0 ± 0.3	2.90 ± 0.01
	Амино Старт	10.3 ± 0.2	5.95 ± 0.12	55.0 ± 0.2	2.97 ± 0.02
Родник Прикамья	Контроль	8.54 ± 0.49	5.33 ± 0.10	56.7 ± 0.9	2.95 ± 0.01
	КАС-28	8.67 ± 0.26	5.69 ± 0.02	54.9 ± 0.3	2.84 ± 0.03
	Амино Старт	8.44 ± 0.20	5.77 ± 0.04	55.8 ± 0.4	2.97 ± 0.01
Памяти Родиной	Контроль	8.56 ± 0.31	5.41 ± 0.16	55.9 ± 0.2	2.99 ± 0.06
	КАС-28	8.75 ± 0.24	5.87 ± 0.07	55.2 ± 0.7	3.00 ± 0.06
	Амино Старт	9.07 ± 0.39	5.77 ± 0.02	54.6 ± 0.5	2.95 ± 0.03

Таблица 3. Содержание хлорофиллов во флаговом и подфлаговом листьях 3-х сортов ярового ячменя, мг/г сухой массы

Пигмент	Год	Сорт		
		Новичок	Родник Прикамья	Памяти Родины
Флаговый лист				
Контроль				
Chl <i>a</i>	2020	5.57 ± 0.03	6.70 ± 0.45	6.72 ± 0.49
	2021	11.5 ± 0.7	10.8 ± 0.2	9.91 ± 0.47
	2022	10.1 ± 0.2	8.46 ± 0.20	9.45 ± 0.26
Chl <i>b</i>	2020	3.67 ± 0.05	4.80 ± 0.26	4.03 ± 0.19
	2021	5.97 ± 0.03	5.93 ± 0.12	5.50 ± 0.33
	2022	5.22 ± 0.09	4.29 ± 0.21	4.64 ± 0.26
КАС-28				
Chl <i>a</i>	2020	6.03 ± 0.19	7.31 ± 0.18	6.30 ± 0.23
	2021	9.14 ± 0.33	9.42 ± 0.43	9.97 ± 0.07
	2022	11.1 ± 0.3	9.13 ± 0.37	8.46 ± 0.33
Chl <i>b</i>	2020	4.34 ± 0.18	4.59 ± 0.09	3.87 ± 0.14
	2021	5.04 ± 0.13	5.12 ± 0.18	5.82 ± 0.13
	2022	5.81 ± 0.17	4.72 ± 0.32	4.18 ± 0.32
Амино Старт				
Chl <i>a</i>	2020	5.92 ± 0.13	6.58 ± 0.43	7.05 ± 0.05
	2021	9.85 ± 0.23	9.20 ± 0.02	9.82 ± 0.05
	2022	9.51 ± 0.32	8.14 ± 0.16	8.71 ± 0.12
Chl <i>b</i>	2020	4.10 ± 0.09	4.34 ± 0.09	4.46 ± 0.06
	2021	5.65 ± 0.21	5.30 ± 0.14	5.57 ± 0.15
	2022	4.80 ± 0.31	3.88 ± 0.06	4.32 ± 0.14
Подфлаговый лист				
Контроль				
Chl <i>a</i>	2020	6.13 ± 0.07	8.03 ± 0.35	7.60 ± 0.10
	2021	11.0 ± 0.1	11.4 ± 0.3	11.1 ± 0.2
	2022	12.6 ± 0.3	11.5 ± 0.04	10.6 ± 0.1
Chl <i>b</i>	2020	4.09 ± 0.05	5.39 ± 0.26	4.97 ± 0.06
	2021	6.46 ± 0.15	6.53 ± 0.13	6.28 ± 0.28
	2022	6.53 ± 0.35	6.21 ± 0.05	5.09 ± 0.13
КАС-28				
Chl <i>a</i>	2020	6.51 ± 0.12	5.36 ± 0.32	7.27 ± 0.20
	2021	10.9 ± 0.2	9.89 ± 0.24	10.78 ± 0.13
	2022	11.8 ± 0.7	12.2 ± 0.3	9.95 ± 0.71
Chl <i>b</i>	2020	4.52 ± 0.08	3.48 ± 0.53	4.55 ± 0.18
	2021	6.29 ± 0.23	6.35 ± 0.19	6.29 ± 0.14
	2022	6.20 ± 0.24	6.45 ± 0.28	4.34 ± 0.51
Амино Старт				
Chl <i>a</i>	2020	6.70 ± 0.04	7.53 ± 0.15	6.89 ± 0.18
	2021	10.4 ± 0.1	10.6 ± 0.4	11.1 ± 0.2
	2022	10.9 ± 0.1	11.2 ± 0.1	9.18 ± 0.13
Chl <i>b</i>	2020	4.74 ± 0.06	4.98 ± 0.27	4.93 ± 0.34
	2021	6.08 ± 0.09	6.37 ± 0.22	6.50 ± 0.27
	2022	5.39 ± 0.19	5.57 ± 0.22	4.33 ± 0.18

в подфлаговом — 57.4%. Это может быть объяснено тем, что для эффективного синтеза хлорофилла необходимы температуры воздуха в пределах 25–30°C, а температуры <10°C останавливают этот процесс [26]. Низкие температуры в течение 3–4 сут до взятия проб (10–12°C) в 2020 г. привели к значительному снижению уровня содержания пигментов в листьях, тогда как в 2021 и 2022 гг. температура воздуха в аналогичный период была на уровне 23–27 и 14–16°C соответственно.

Фактор “сорт” оказал минимальное статистически значимое влияние на содержание Chl *a* в обоих листьях (0.7 и 0.5%) и немного большее — на содержание Chl *b* (2.2 и 4.3%). Доля влияния вариантов некорневой обработки была соответственно 1.4, 1.9, 1.1 и 2.7%.

В условиях нашего эксперимента усредненные данные для сортов указывали на отрицательное влияние некорневых обработок на концентрацию (мг/г сухой массы) фотосинтетических пигментов в подфлаговом листе: изменение содержания Chl *a* под влиянием КАС-28 составило по годам: –12.0, –6.0 и –2.2%, под влиянием Амино Старт: –2.9, –4.2 и –9.9%; Chl *b* — –13.3, –1.7, –4.7% (КАС-28) и 1.2, –1.6, –14.1 (Амино Старт).

Что касается пигментов флагового листа, то в 2020 г. под воздействием некорневых обработок произошло небольшое повышение содержания пигментов от 2.4 до 3.5%. В условиях 2022 г. было отмечено положительное влияние препарата КАС-28 только на содержание Chl *a* флагового листа (прирост 2.7%). В остальных вариантах 2022 г., а также всех вариантах в 2021 г. выявлено снижение содержания пигментов на 5.0–11.2%.

Снижение содержания хлорофилла в единице массы листа может быть следствием стимулирующего эффекта некорневого внесения дополнительного азота на такие параметры, как площадь листьев и их сухая масса, как отмечают в научной литературе [27], значительная часть азота расходуется на построение биомассы, чем на синтез хлорофилла и это приводит к некоторому снижению его концентрации. Второе возможное объяснение заключается в том, что дополнительное внесение азота в виде некорневых обработок стимулирует фотосинтетические процессы, в результате которых усиливается синтез первичных фотоассимилятов и в листьях накапливается больше углерод-содержащих соединений [28, 29], что приводит, с одной стороны, к увеличению сухой массы листа, а с другой — к снижению относительной доли хлорофилла в единице этой массы. Также можно предположить усиление ремобилизации азота из верхних листьев в репродуктивную часть растений под влиянием некорневых обработок азотсодержащими препаратами, т.е.

большую скорость распада хлорофилла по сравнению с контролем без обработки. Поскольку содержание хлорофилла в листьях положительно коррелировало с содержанием азота в вегетативных органах [9, 30], усиливающийся отток азота в репродуктивные органы будет параллельно приводить к снижению содержания пигментов.

Поскольку условия года выращивания оказали очень сильное влияние на анализируемые показатели, были рассчитаны доли влияния генотипа (сорта) и некорневых обработок отдельно для каждого из лет исследования. При этом оказалось, что влияние сорта на вариабельность содержания пигментов в листьях ярового ячменя менялось в широких пределах: от статистически незначимого (для Chl *a* и *b* во флаговом листе в 2021 г., Chl *b* в подфлаговом листе в 2020 г.) до 69.3% (для Chl *b* в подфлаговом листе в 2022 г.). Влияние некорневых обработок было статистически значимым во все годы исследования для обеих форм хлорофиллов в обоих листьях, варьируя от 2.5 (Chl *b* во флаговом листе в 2020 г.) до 50.8% (Chl *a* во флаговом листе в 2021 г.). В целом в опыте влияние сорта было в 1.5 раза более сильным, чем некорневых обработок (соответственно 32.5 и 20.2%).

Анализ парных корреляций между величинами показателей качества зерна и содержанием пигментов в 2-х верхних листьях растений ячменя в целом за 3 года исследования позволил выявить наличие следующих закономерностей (табл. 5).

Применение некорневой обработки растений ярового ячменя в фазе кущения препаратом КАС-28 усилило взаимосвязь показателей качества зерна с содержанием хлорофилльных пигментов в 2-х верхних листьях по сравнению с контрольным вариантом. Кроме отмеченных для контрольного варианта статистически значимых парных корреляций, отмечены новые пары признаков, значимо коррелирующих друг с другом при $p \leq 0.05$: содержание Chl *a* во флаговом листе и жира в зерне, Chl *b* во флаговом листе и клетчатки и крахмала в зерне, Chl *b* в подфлаговом листе и клетчатки в зерне.

Влияние препарата Амино Старт было не таким однозначным: стала менее выраженной связь содержания Chl *a* в подфлаговом листе и клетчатки в зерне, Chl *b* в обоих листьях и белка в зерне, Chl *b* в подфлаговом листе и жира в зерне; связи содержания Chl *a* в подфлаговом листе с содержанием жира, как и Chl *b* в подфлаговом листе и крахмала стали статистически незначимыми. В то же время связи в парах “Chl *a* во флаговом листе–клетчатка в зерне” и “Chl *b* во флаговом листе–жир в зерне” усилились, связь содержания Chl *b* в подфлаговом листе и клетчатки в зерне стала статистически значимой при $p \leq 0.05$.

Таблица 5. Коэффициенты парных корреляций между содержанием хлорофилла в листьях (мг/г сухой массы) и показателями качества (содержание, %) зерна ярового ячменя

Показатель качества зерна	Chl <i>a</i>		Chl <i>b</i>		Суммарный хлорофилл	
	Флаговый лист	Подфлаговый лист	Флаговый лист	Подфлаговый лист	Флаговый лист	Подфлаговый лист
Контроль без обработки						
Белок	-0.005	-0.501	-0.744*	-0.868*	-0.428	-0.770*
Клетчатка	0.740*	0.893*	0.651	0.658	0.821*	0.829*
Крахмал	0.208	0.541	0.617	0.683*	0.479	0.676*
Жир	0.463	0.815*	0.693*	0.769*	0.677*	0.860*
Некорневая обработка КАС-28						
Белок	-0.576	-0.611	-0.842*	-0.885*	-0.795*	-0.818*
Клетчатка	0.872*	0.918*	0.709*	0.824*	0.845*	0.941*
Крахмал	0.266	0.372	0.695*	0.732*	0.562	0.608
Жир	0.826*	0.899*	0.749*	0.856*	0.849*	0.949*
Некорневая обработка Амино Старт						
Белок	-0.029	-0.134	-0.718*	-0.712*	-0.484	-0.524
Клетчатка	0.768*	0.792*	0.670*	0.655	0.863*	0.863*
Крахмал	0.003	0.085	0.507	0.483	0.333	0.352
Жир	0.628	0.655	0.713*	0.692*	0.813*	0.808*

* Коэффициенты корреляции статистически значимы при $p \leq 0.05$.

Таким образом, в обоих опытных вариантах некорневой обработки отмечены статистически значимые корреляции всех показателей качества зерна и содержания Chl *b* в 2-х верхних листьях, тогда как для Chl *a* статистически значимой была связь только с содержанием в зерне клетчатки и жира.

Для практического использования в полевых условиях в качестве экспресс-метода оценки азотного состояния растений и принятия решения о необходимости некорневой обработки в последние годы все чаще используют портативные хлорофиллометры, иногда называемые N-тестерами, типа SPAD502, Yara NTesterTM (Konica Minolta, Japan), или CCM200 (OptiSciences, USA). Отмечено, что показатели этих приборов, выражаемые в собственных единицах, коррелируют с суммарным содержанием хлорофилла в листьях зерновых культур [9, 11]. Поэтому нами были дополнительно рассчитаны коэффициенты парных корреляций между показателями качества зерна и суммарным содержанием хлорофилла в листьях растений ярового ячменя, также представленные в табл. 5.

Как следует из этих данных, суммарное содержание хлорофилла во флаговом листе коррелирует с содержанием в зерне клетчатки и жира во всех вариантах обработки, а при использовании КАС-28 — еще и с содержанием белка. Что касается подфлагового листа, то отмечены статистически значимые корреляции со всеми 4-мя показателями качества в контрольном варианте, но применение КАС-28,

усилив связи с белком, клетчаткой и жиром, привело к незначимости связи с содержанием крахмала. В случае с препаратом Амино Старт незначимыми стали связи с содержанием белка и крахмала. В основном это может быть объяснено низкими парными корреляциями с содержанием Chl *a*.

На основе данных о взаимосвязи анализируемых показателей были рассчитаны уравнения регрессии, показывающие количественное влияние изменения содержания пигментов в листьях на качество зерна (табл. 6).

Эти уравнения позволяют выявить действие некорневых обработок на эффективность работы пигментного аппарата. Например, увеличение содержания суммарного хлорофилла во флаговом листе на 1 мг/г сухой массы в контрольном варианте приводило к повышению содержания клетчатки на 0.251, КАС-28 — на 0.225, Амино Старт — на 0.396%. Для содержания жира в зерне аналогичные величины равны 0.125, 0.114 и 0.187%. Отсюда следует, что по сравнению с контролем без обработки применение КАС-28 несколько снижало эффективность использования фотоассимилятов для синтеза клетчатки и жира (на 10.4 и 8.8%), а применение Амино Старт, наоборот, существенно повышало (на 57.8 и 49.6%).

Аналогично для подфлагового листа повышение содержания хлорофилла на 1 мг/г сухой массы соответствовало повышению эффективности синтеза клетчатки при обработке КАС-28 на 10.4%, Амино

Таблица 6. Уравнения регрессии, количественно связывающие суммарное содержание хлорофилла в листьях и показатели качества зерна ярового ячменя

Показатель качества зерна	Вариант обработки	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации R^2
Флаговый лист			
Белок	КАС-28	$Y = -0.256X + 14.412$	0.63
Клетчатка	Контроль	$Y = 0.251X + 0.938$	0.67
	КАС-28	$Y = 0.225X + 1.344$	0.71
	Амино Старт	$Y = 0.396X - 0.944$	0.74
Жир	Контроль	$Y = 0.125X + 0.498$	0.46
	КАС-28	$Y = 0.114X + 0.601$	0.72
	Амино Старт	$Y = 0.187X - 0.351$	0.66
Подфлаговый лист			
Белок	Контроль	$Y = -0.221X + 14.391$	0.59
	КАС-28	$Y = -0.211X + 14.054$	0.67
Клетчатка	Контроль	$Y = 0.182X + 1.412$	0.69
	КАС-28	$Y = 0.201X + 1.412$	0.88
	Амино Старт	$Y = 0.346X - 0.797$	0.74
Жир	Контроль	$Y = 0.114X + 0.334$	0.74
	КАС-28	$Y = 0.102X + 0.629$	0.90
	Амино Старт	$Y = 0.162X - 0.265$	0.65
Крахмал	Контроль	$Y = 0.445X + 45.216$	0.46

Старт – почти в 2 раза, на 90.1%. Синтез жира усиливался при обработке Амино Старт на 42.1, а при обработке КАС-28, наоборот, снижался на 10.5%. Вероятно, препарат КАС-28 снижал эффективность улавливания фотосинтетически активной радиации молекулами хлорофилла, поскольку, по мнению авторов работы [31], концентрация жира в зерне определяется главным образом количеством солнечной энергии, улавливаемой растениями в период созревания зерна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные о содержании в зерне 3-х сортов ярового ячменя белка (8.44–13.1%), крахмала (47.7–56.7%), клетчатки (2.,81–5.95%) и жира (1.37–3.00%) укладываются в типичный для этого вида предел варьирования исследованных показателей. Для каждого из изученных параметров качества отмечены значимые отличия в вариантах применения некорневой обработки в конкретные годы исследования.

В целом погодные условия года вегетации в проведенном эксперименте оказали основное влияние на изменчивость содержания хлорофиллов в листьях: для Chl *a* во флаговом листе – 79.4, в подфлаговом – 84.5%, для Chl *b* во флаговом листе – 60.0, в подфлаговом – 57.4%. Влияние некорневой обработки было сильнее, чем фактора “сорт” в обоих листьях для Chl *a* (1.4, 1.9 и 0.7, 0.5% соответственно), для Chl *b* – наоборот (1.1, 2.7

и 2.2, 4.3% соответственно). В среднем в опыте выявлено отрицательное влияние некорневых обработок на содержание пигментов в подфлаговом листе: изменение содержания Chl *a* под влиянием КАС-28 было в пределах –2.2...12.0%, под влиянием Амино Старт – –2.9...9.9%; Chl *b* – –1.7... –13.3% (КАС-28) и 14.1...1.2 (Амино Старт). Во флаговом листе некорневые обработки привели к повышению содержания пигментов в 2020 г. (2.4–3.5%), в 2022 г. положительное влияние было отмечено только в варианте обработки КАС-28 (прирост 2.7% содержания Chl *a* во флаговом листе). В остальных вариантах в 2022 г. и всех вариантах в 2021 г. выявлено снижение содержания пигментов на 5.0–11.2%.

В разные годы опыта влияние некорневых обработок было статистически значимым для обеих форм хлорофиллов в обоих листьях, варьируя от 2.5% (Chl *b* во флаговом листе в 2020 г.) до 50.8% (Chl *a* во флаговом листе в 2021 г.).

Применение КАС-28 усилило связь показателей качества зерна с содержанием хлорофилльных пигментов 2-х верхних листьев по сравнению с контрольным вариантом. В дополнение к выявленному в контрольном варианте, отмечены новые пары признаков, значимо коррелирующие друг с другом при $p \leq 0.05$: содержание Chl *a* во флаговом листе и жира в зерне; Chl *b* во флаговом листе и клетчатки и крахмала в зерне; Chl *b* в подфлаговом листе и клетчатки в зерне. Влияние препарата Амино Старт было неоднозначным: связи

содержания Chl *a* в подфлаговом листе и клетчатке в зерне, Chl *b* в обоих листьях и белка в зерне, Chl *b* в подфлаговом листе и жира в зерне несколько ослабли; стали незначимыми связи содержания Chl *a* в подфлаговом листе с содержанием жира, как и Chl *b* в подфлаговом листе и крахмала. В то же время связи в парах “Chl *a* во флаговом листе—клетчатка в зерне” и “Chl *b* во флаговом листе—жир в зерне” усилились; связь содержания Chl *b* в подфлаговом листе и клетчатки в зерне стала статистически значимой.

Суммарное содержание хлорофилла (Chl *a* + Chl *b*) во флаговом листе коррелировало с содержанием в зерне клетчатки и жира во всех вариантах обработки, а при использовании КАС-28 — еще и с содержанием белка. Для подфлагового листа отмечены значимые корреляции со всеми показателями качества в контрольном варианте, но применение КАС-28, усилив связи с белком, клетчаткой и жиром, привело к незначимости связи с содержанием крахмала. В варианте применения Амино Старт незначимыми стали связи с содержанием белка и крахмала. Согласно уравнениям регрессии, увеличение содержания суммарного хлорофилла во флаговом листе на 1 мг/г сухой массы привело к повышению содержания клетчатки в контрольном варианте на 0.251, КАС-28 — на 0.225, Амино Старт — на 0.396%. Для содержания жира в зерне аналогичные величины были равны 0.125, 0.114 и 0.187%. Таким образом, по сравнению с контролем без обработки, применение КАС-28 снижало эффективность использования фотоассимилятов для синтеза клетчатки и жира (на 10.4 и 8.8%), а применение Амино Старт, наоборот, существенно повышало (на 57.8 и 49.6%). Аналогично для подфлагового листа, повышение содержания хлорофилла на 1 мг/г сухой массы соответствовало усилению эффективности синтеза клетчатки при обработке КАС-28 на 10.4%, Амино Старт — почти в 2 раза, на 90.1%. Синтез жира увеличивался при обработке Амино Старт на 42.1, а при обработке КАС-28, наоборот, снижался на 10.5%.

В целом, полученные данные указывали на возможность прогноза содержания основных показателей качества зерна ярового ячменя по содержанию хлорофилльных пигментов во флаговом или подфлаговом листьях растений в фазе цветения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Naibaho J., Korzeniowska M., Wojdyło A., Figiel A., Yang B., Laaksonen O., Foste M., Vilu R., Viiard E. The potential of spent barley as a functional food ingredient: study on the comparison of dietary fiber and bioactivity // *Proceedings*. 2021. V. 70. № 1. Art. 86. https://doi.org/10.3390/foods_2020-08486
2. Biel W., Jacyno E. Chemical composition and nutritive value of spring hulled barley varieties // *Bulgar. J. Agr. Sci.* 2013. V. 19. № 4. P. 721–727.
3. Towfiq S.I., Abdulqader S.H., Ahmad K.R., Hama S.J. Response of grain yield and its components to organic matter and removal of some photosynthetic organs of durum wheat (*Triticum aestivum* L.) in two years of Sulaimani — Iraq region // *Int. J. Plant Anim. Environ. Sci.* 2015. № 5. P. 134–140.
4. López-Bellido R.J., Shepherd C.E., Barraclough P.B. Predicting post-anthesis N requirements of bread wheat with Minolta SPAD meter // *Eur. J. Agron.* 2004. V. 20. № 3. P. 313–320. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(03\)00025-X](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(03)00025-X)
5. Racz I., Hiriščau D., Berindean I., Kadar R., Muntean E., Tritean N., Russu F., Ona A., Muntean L. The influence of flag leaf removal and its characteristics on main yield components and yield quality indices on wheat // *Agronomy*. 2022. V. 12. № 10. Art. 2545. <https://doi.org/10.3390/agronomy12102545>
6. Vicente R., Vergara-Díaz O., Medina S., Chairi F., Kefauver S.C., Bort J., Serret M.D., Aparicio N., Araus J.L. Durum wheat ears perform better than the flag leaves under water stress: Gene expression and physiological evidence // *Environ. Exp. Bot.* 2018. V. 153. P. 271–285. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.06.004>
7. Fuertes-Mendizábal T., Estavillo J.M., Duñabestia M.K., Huérfano X., Castellón A., González-Murua C., Aizpurua A., González-Moro M.B. ¹⁵N natural abundance evidences a better use of N sources by late nitrogen application in bread wheat // *Front. Plant Sci.* 2018. V. 9. Art. 853. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00853>
8. Jaeger A., Zannini E., Sahin A.W., Arendt E.K. Barley Protein properties, extraction and applications, with a focus on brewers' spent grain protein // *Foods*. 2021. V. 10. Art. 1389. <https://doi.org/10.3390/foods10061389>
9. Aranguren M., Castellón A., Aizpurua A. Wheat grain protein content under mediterranean conditions measured with chlorophyll meter // *Plants*. 2021. V. 10. Art. 374. <https://doi.org/10.3390/plants10020374>
10. Kendal E. Relationship between chlorophyll and other features in durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) using SPAD and biplot analyses // *J. Agr. Sci. Tech.* 2015. V. 17. № 7. P. 1873–1886. <http://jast.modares.ac.ir/article-23-8081-en.html>
11. Ghassemi-Golezani K., Mousavi S.A. Improving physiological performance and grain yield of maize by salicylic acid treatment under drought stress // *J. Plant Physiol. Breed.* 2022. V. 12. № 2. P. 1–10. <https://dx.doi.org/10.22034/jppb.2022.16041>
12. Noskova E.N., Lisitsyn E.M., Shchennikova I.N., Svetlakova E.V. Top-dressing treatment of spring

- barley to modify its quality // *Food. Raw Mater.* 2023. V. 11. № 1. P. 106–115.
<https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-562>
13. *Абашев В.Д., Светлакова Е.В., Попов Ф.А., Носкова Е.Н., Денисова А.В.* Влияние возрастающих доз и соотношений минеральных удобрений на урожайность и качество зерна ячменя // *Аграрн. наука Евро-Северо-Востока.* 2016. № 1. С. 24–30.
 14. *Семенюк О.В.* Эффективность применения жидких органо-минеральных удобрений ПОЛИДОН® и стимулятора роста растений АльфастиМ® на посевах озимой пшеницы // *Земледелие.* 2017. № 1. С. 44–46.
 15. *Sundaram P.K., Mani I., Lande S.D., Parray R.A.* Evaluation of urea ammonium nitrate application on the performance of wheat // *Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci.* 2019. V. 8. № 1. P. 1956–1963.
<https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.801.205>
 16. *Есаулко А.Н., Гарибджанян Г.А., Голосной Е.В., Громова Н.В.* Эффективность применения жидких и твердых азотных минеральных удобрений в ранневесеннюю подкормку посевов озимой пшеницы // *Земледелие.* 2020. № 3. С. 38–40.
<https://doi.org/10.24411/0044-3913-2020-10310>
 17. *Lichtenthaler H.K., Buschmann C.* Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterization by UV–VIS spectroscopy // *Current Protocols in Food Analytical Chemistry (CPFA)* / Eds. Wrolstad R.E., Acree T.E., An H., Decker E.A., Penner M.H., Reid D.S., Schwartz S.J., Shoemaker C.F., Sporns P.N.Y.: John Wiley and Sons, 2001. F4.3.1–F4.3.8.
<https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01>
 18. *Филиппов Е.Г., Донцова А.А., Донцов Д.П., Буланова А.А., Игнатьева Н.Г.* Качество зерна коллекционных образцов озимого ячменя // *Зерн. хоз-во России.* 2018. № 3. С. 39–43.
<https://doi.org/10.31367/2079-8725-2018-57-3-39-43>
 19. *Ortiz L.T., Velasco S., Treviño J., Jiménez B., Rebolé A.* Changes in the nutrient composition of barley grain (*Hordeum vulgare* L.) and of morphological fractions of sprouts // *Scientifica.* 2021. V. 2021. Art. 9968864.
<https://doi.org/10.1155/2021/9968864>
 20. *Ain H.B.U., Saeed F., Ahmad N., Imran A., Niaz B., Afzaal M., Imran M., Tufail T., Javed A.* Functional and health-endorsing properties of wheat and barley cell wall's non-starch polysaccharides // *Inter. J. Food Propert.* 2018. V. 21. № 1. P. 1463–1480.
<https://doi.org/10.1080/10942912.2018.1489837>
 21. *Сумина А.В., Полонский В.И.* Содержание ценных веществ в зерне ячменя, выращенного в контрастных климатических условиях // *Сибир. вестн. сел.-хоз. науки.* 2020. Т. 50. № 1. С. 23–31.
<https://doi.org/10.26898/0370-8799-2020-1-3>
 22. *Izydorczyk M., Nam S., Sharma A., Kletke J.* Exploring dry grain fractionation as a means to valorize high-protein malting barley // *Cereal Chem.* 2021. V. 98. P. 840–850.
<https://doi.org/10.1002/cche.10426>
 23. *Havrlentova M., Babulicová M., Dyulgerova B., Hendrichová J., Valcheva D., Vulchev D., Hašana R.* Grain quality of spring barley genotypes grown at agro-ecological conditions of the Slovak Republic and the Republic of Bulgaria // *J. Centr. Eur. Agricult.* 2020. V. 21. № 4. P. 775–788.
<https://doi.org/10.5513/JCEA01/21.4.2980>
 24. *Николаев П.Н., Юсова О.А., Аниськов Н.И., Сафонова И.В.* Агробиологическая характеристика голозерных сортов ячменя селекции Омского АНЦ // *Тр. по прикл. бот., генет. и селекции.* 2019. Т. 180. № 1. С. 38–43.
<https://doi.org/10.30901/2227-8834-2019-1-38-43>
 25. *Biel W., Kazimierska K., Bashutska U.* Nutritional value of wheat, triticale, barley and oat grains // *Acta Sci. Pol. Zootech.* 2020. V. 19. № 2. P. 19–28.
<https://doi.org/10.21005/asp.2020.19.2.03>
 26. *Nagata N., Tanaka R., Tanaka A.* The major route for chlorophyll synthesis includes [3,8-divinyl]-chlorophyllide a reduction in *Arabidopsis thaliana* // *Plant Cell Physiol.* 2007. V. 48. P. 1803–1808.
<https://doi.org/10.1093/pcp/pcm153>
 27. *Momen M.B.H., Razzak A., Rahman T.M.R., Yasmin M.N., Salahin M., Khan T.A., Islam M.R.* Improvement of leaf chlorophyll content and yield of maize through calibration of optimum basal and top dressing urea // *Inter. J. Asian Contempor. Res.* 2022. V. 2(3). P. 80–86.
 28. *Zhou X., Kono Y., Win A., Matsui T., Tanaka T.S.T.* Predicting within-field variability in grain yield and protein content of winter wheat using UAV-based multispectral imagery and machine learning approaches // *Plant Prod. Sci.* 2020. V. 24. № 2. P. 1–15.
<https://doi.org/10.1080/1343943X.2020.1819165>
 29. *Acreche M.M., Slafer G.A.* Variation of grain nitrogen content in relation with grain yield in old and modern Spanish wheats grown under a wide range of agronomic conditions in a Mediterranean region // *J. Agric. Sci.* 2009. V. 147. P. 657–667.
<https://doi.org/10.1017/S0021859609990190>
 30. *Argenta G., Silva P.R.F., Bortolini C.G., Forsthofer E.L., Strieder M.L.* Relationship of reading with the chlorophyll content of chlorophyll and extractable nitrogen in maize leaf // *Rev. Bras. Fisiol. Veg.* 2001. V. 13. P. 158–167.
 31. *Izquierdo N., Aguirrezábal L.* Genetic variability in the response of fatty acid composition to minimum night temperature during grain filling in sunflower // *Field Crop Res.* 2008. V. 106. № 2. P. 116–125.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.10.016>

Effect of Top-Dressing on Chlorophyll Content in Barley Leaves and Its Relation to Grain Quality Parameters

E. N. Noskova^a, E. M. Lisitsyn^{a,#}

¹ Rudnitsky Federal Agricultural Research Center of the North-East,
ul. Lenina 166a, Kirov 610007, Russia

[#]E-mail: edaphic@mail.ru

The effect of top-dressing at tillage phase by Polydon® Amino Start organo-mineral fertilizer and KAS-28 liquid mineral fertilizer on the state of the leaf pigment complex of spring barley cv. Novichok, Rodnik Prikamya and Pamyati Rodinoy and its relationship with grain quality parameters was studied under field conditions of the Kirov region of the Russian Federation in 2020–2022. Significant effect of top-dress treatments on pigment content in the flag and second leaves was revealed. The use of top-dressing with KAS-28 enhanced the association of grain quality parameters with the chlorophyll pigment content of the two upper leaves compared to the control variant. The effect of Amino Start was not uniform: some of the connections were somewhat weakened compared to the control, some intensified, and some became statistically significant. The total content of chlorophyll correlated with the content of cellulose and fat in the grain in all treatments. Compared to controls, the use of top-dress treatments altered the effectiveness of using of photoassimilates of both leaves for cellulose and fat synthesis. The obtained data indicate the possibility of predicting the content of the main parameters of spring barley's grain quality by the content of chlorophyll pigments in flag or second leaves of plants during the flowering phase.

Keywords: pigments, protein, starch, cellulose, fat, correlation, flag leaf, second leaf.

УДК 631.87:635.52:635.72

ВЛИЯНИЕ РАЗНЫХ СПОСОБОВ ВНЕСЕНИЯ ЛИГНОГУМАТА НА КАЧЕСТВО ПРОДУКЦИИ ЗЕЛЕННЫХ КУЛЬТУР И ЛЕКАРСТВЕННЫХ РАСТЕНИЙ[§]

© 2024 г. Е. Б. Пашкевич^{1,*}, Г. Е. Ларина², М. В. Парахина¹¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, факультет почвоведения
119991 Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, корп. 12, Россия²Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии 143050 Московская область,
Одинцовский район, р.п. Большие Вяземы, ул. Институт, влад. 5, Россия

*E-mail: pashkevich05@list.ru

Изучили эффективность применения лигногумата на салате листовом (однолетняя зеленная культура) и мяте перечной (многолетнее лекарственное растение), выращенных в условиях вегетационных опытов. Сочетание лигногумата с внесением в торф хелатных удобрений, содержащих микроэлементы (цинк, медь), показало существенный положительный эффект для получения качественной растительной продукции. Наиболее эффективной была система удобрения, включавшая комбинацию лигногумата с хелатными формами цинка и меди: прибавка биомассы салата составила 29–32, мяты – 71–79%, содержание в растениях макро- и микроэлементов стало оптимальным.

Ключевые слова: удобрения, гуминовый препарат, лигногумат, зеленная культура, лекарственное растение, продуктивность, фотосинтетические пигменты, салат листовой (*Lactuca sativa* L.), мята перечная (*Mentha piperita* L.).

DOI: 10.31857/S0002188124040079, EDN: dluatk

ВВЕДЕНИЕ

Получение стабильной растительной продукции на искусственных субстратах в теплицах и на почве с низким плодородием на сельхозугодиях возможно с применением систем удобрения. Одним из их важных компонентов является органическое вещество и его “аналоги” – гуминовые препараты. В настоящее время известны удобрения на основе гуматов и лигнина (лигногумат, лигносульфонат), которые отличаются производственными циклами и исходным сырьем, служащим для их получения [1, 2]. Гуминовые препараты на основе гуматов, которые получают из углей (леонардита), торфов и сапропелей, содержат 1–10% солей фульвовых кислот, а на основе лигногуматов – из древесины, целлюлозы и содержат до 40% солей фульвовых кислот [3].

Фульвокислоты отличаются низким содержанием азота и высокой растворимостью солей в воде.

[§] Исследование выполнено в рамках совместной темы НИР на 2021–2025 гг. лаборатории корневого питания и качества растений и лаборатории агроэкологии факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова “Разработка и оценка комплекса инновационных агрохимических препаратов, мелиорантов, регуляторов роста в условиях агро-, техногенеза и городской среды”.

Фульвовые кислоты накапливаются в клеточном соке во всех органах растения, тем самым проявляя стимулирующее и восстановительное действие на протяжении всего вегетационного периода растений. Поэтому применение удобрения с фульвокислотами лучше работает при некорневом применении, а при внесении в почву обязателен полив растения. Но существенные отличия свойств гуминовых препаратов связаны с дополнительными примесями и балластными включениями в зависимости от технологии производства, следовательно, может быть неясный результат при применении таких удобрений [4].

Несомненно важно и актуально знать особенности применения лигногуматов в системе удобрения культур, выращиваемых в тепличных условиях. В данной работе изучение удобрения было акцентировано на лигногуматах, получение которых экономически оправдано при утилизации растительных отходов лесной и деревообрабатывающей промышленности. Цель работы – изучение влияния удобрения на основе лигногумата и хелатов микроэлементов (меди и цинка) на качество полученной растительной продукции – салата листового и мяты перечной в вегетационном опыте.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Вегетационный опыт был заложен в теплице из сетки-рабицы на базе факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова по общепринятой методике при естественных влажности воздуха, освещенности и температуре окружающей среды.

Перед закладкой опыта торфяной субстрат не требовал гомогенизации, т.е. был однородным. В водной вытяжке исходного торфяного субстрата (верховой произвесткованный незаправленный марки “Агробалт-С”) определяли кислотность (рН) – ионометрическим методом (ГОСТ 26423-85), аммиачный азот – фотометрическим, нитратный азот – фотометрическим по Грандваль–Ляжу, фосфор – фотометрическим после окрашивания по Дениже, калий – пламенно-фотометрическим методом (ГОСТ 27753.6-88). Содержание микроэлементов (цинка и меди) в растительной продукции определяли методом пламенной атомной адсорбции после сухого озоления (ГОСТ 26573.2-2014).

В исходном субстрате рН был равен 5.84, содержание аммонийного азота – 2.1, нитратного – 15.8, подвижного фосфора – 24.2, подвижного калия – 440 мг/кг воздушно-сухого торфа. Перед закладкой опыта в торфяной субстрат вносили основное (базовое) удобрение, в составе которого были аммиачная селитра (NH_4NO_3), двойной суперфосфат ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) и хлорид калия (KCl), из расчета для каждого удобрения 100 мг д.в./кг воздушно-сухого торфа. Микроэлементы применяли в хелатной форме в дозах 3 мг д.в. меди и 23 мг д.в. цинка на 1 кг воздушно-сухого торфа. Все удобрения вносили в торф в виде водных растворов. Готовый субстрат тщательно перемешивали и набивали в сосуды, вес воздушно-сухого торфа составил 0.51 кг на сосуд объемом 3 л.

В качестве органического удобрения применяли порошкообразный продукт с коммерческим

названием “Лигногумат®” (марка А, производства НПО “Реализация Экологических Технологий”, Санкт-Петербург).

Один из доказанных эффектов внесения гуминовых препаратов в грунты – это уменьшение биологической доступности тяжелых металлов (ТМ) с образованием комплекса гуминовое вещество–металл [5, 6]. Вопрос о продолжительности связывания фитотоксиканта, лимитирующего условия поступления ТМ в растение, мало изучен. Поэтому в схему опыта включены варианты с внесением в торф хелатных удобрений цинка (Zn) и меди (Cu) в качестве микроэлементов (МЭ).

Все минеральные удобрения, лигногумат, хелат меди и хелат цинка вносили в торф (корневое внесение) и дополнительно применяли лигногумат в виде некорневой (листовой) подкормки в период роста растений, а также совместно: вносили лигногумат в торф и в виде листовой подкормки. Схема опыта включала 9 вариантов в 3-х повторностях для каждой культуры – салата листового (*Lactuca sativa* L.) сорта Витаминный и мяты перечной (*Mentha piperita* L.) сорта Кубанская-6 (табл. 1).

Лигногумат применяли следующими способами: корневое внесение – 143.5 мг/сосуд (из расчета 100 мг углерода/кг воздушно-сухого торфа). При листовой обработке применяли раствор лигногумата в концентрации 0.01% (1 г препарата/л воды согласно инструкции по применению лигногумата (<https://lignohumate.ru/primenenie-lignogumata/normy-i-sposob-vneseniya-udobreniy/>)), его наносили до полного смачивания листа. Корневое внесение лигногумата проводили при закладке опыта, листовую обработку – дважды за вегетационный период на 14-е и 24-е сут после начала опыта.

После подготовки субстрата, внесения удобрений и набивки сосудов проводили посев семян салата листового (*Lactuca sativa* L.) и посадку укорененных

Таблица 1. Схема вегетационных опытов 2021–2022 гг.

Вариант, №	Внесение удобрения		
	базовое (NPK)	лигногумат (Л)	хелаты МЭ
1 (контроль)	0	0	0
2	К	0	0
3	К	0	К
4	К	К	0
5	К	Л	0
6	К	К + Л	0
7	К	К	К
8	К	Л	К
9	К	К + Л	К

Примечание. 0 – удобрение не применяли, К – корневое внесение, Л – листовая обработка, К + Л – смешанное применение.

черенков мяты перечной (*Mentha piperita* L.) высотой 10 см по 3 растения в сосуде. Сосуды увлажняли и укрывали армированным белым нетканым материалом для создания оптимальных условий адаптации растений. Через 5 сут укрытие снимали, для растений салата проводили прореживание до 8-ми растений/сосуд. В ходе проведения вегетационного опыта был организован систематический полив и уход за растениями, своевременное удаление сорняков. При поливе сосудов для выравнивания условий освещения делали их перестановку на стеллаже. Уборку растительной продукции проводили: салата – на 32-е сут и мяты – на 80-е сут после посева. Растения срезали ножницами, взвешивали, отбирали среднюю пробу (ГОСТ 58588-2019).

В листьях растений определяли содержание общего азота, фосфора, калия, нитратного азота, белкового азота, цинка и меди по гостированным методикам [7], фотометрическим методом оценили активность пигментного комплекса по содержанию хлорофилла *a* и *b*, а также каротиноидов [8], активность фермента каталазы – титрованием [9].

Организацию вегетационных опытов и проведение наблюдений осуществляли по общепринятым

методикам [10]. Статистическую обработку опытных данных проводили в программах MS Excel 2013 и Statistica 10.0. Достоверность различий определяли по величине критерия Фишера (*F*) при уровне значимости $p < 0.050$ [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Визуально рост и развитие тестовых растений в опытных вариантах были сопоставимы с контролем. Сравнительный анализ сырой и сухой биомассы салата и мяты показал существенное превышение этого показателя по сравнению с контрольными вариантами.

Максимальная прибавка сухой биомассы (55–61%) относительно контроля получена в опыте с салатом в вариантах 8 и 6, мяты – на 315–353% относительно контроля в вариантах 8 и 9 (рис. 1).

Наибольшая сырая биомасса салата, превышающая контроль на 18–26%, была отмечена в вариантах 6 и 8, мяты (на 23–28%) – в вариантах 2, 4 и 7. Полученный результат можно объяснить биологическими особенностями культур (высокая тесная связь

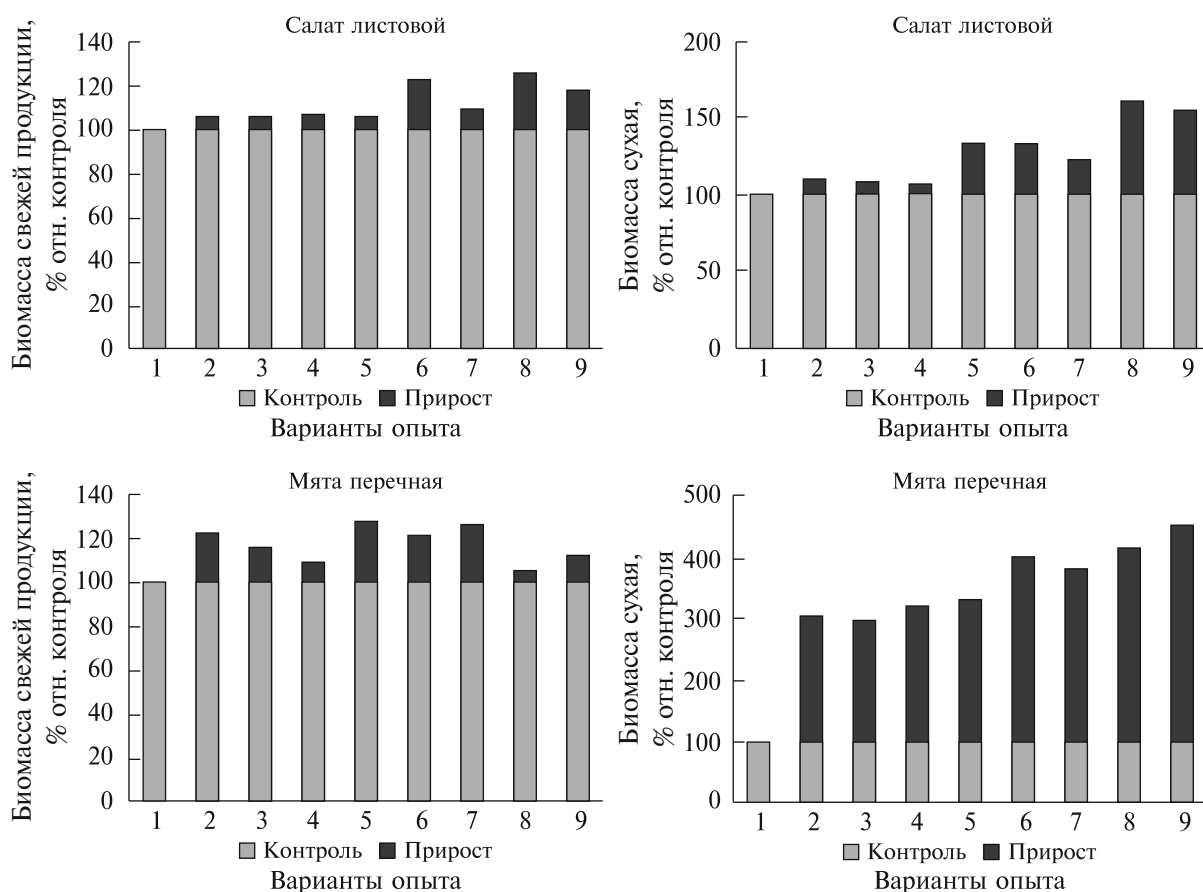


Рис. 1. Биомасса влажных и сухих растений в вариантах опыта с применением удобрений, % относительно контроля. HSP_{05} прибавки урожая свежей продукции салата – 5.3, сухой – 1.4%, свежей мяты – 5.4, сухой мяты – 1.6%.

показателей – $r \geq 0.91$) и их требованиями к количеству влаги ($r = 0.89–0.90$). Для выращивания салата оптимальный уровень влажности субстрата был равен 60–70% наименьшей влагоемкости (**НВ**), мяты (влаголюбивого растения) – $>80\%$ **НВ**.

Данные корреляционного анализа показали тесную прямую связь, равную $r \geq 0.999$ ($p < 0.050$) между следующими вариантами: в опыте с салатом – 6 и 8, 9; 8 и 9; мятой – 2 и 3, 4, 6; 6 и 7; 8 и 9, т.е. способ совместного внесения лигногумата был эффективен на зеленных культурах, в частности, салате. Для мяты были получены неоднозначные результаты, в варианте внесения базового корневого удобрения не установлен существенный эффект применения МЭ и лигногумата.

При выращивании салата рекомендованы следующие показатели содержания азота (N), фосфора (P_2O_5) и калия (K_2O) в торфяном субстрате: 400, 420, 1000 мг/кг сухого торфа соответственно; мяты – 240, 360 и 240 мг/кг [12]. В исходном субстрате его обеспеченность нитратным азотом была равна 15.8, фосфором – 24.2 и калием – 440 мг/кг, что отличалось от оптимальных показателей для роста культуры и компенсировалось внесением удобрений. По уровню значимости основные элементы питания располагались в убывающей последовательности: N–P–K–S–Mg–Zn–Fe–B–Mn–Cu–Mo, где эффекты меди и молибдена были малозаметными и представляли собой совместное влияние (комбинацию) с N, P, K, S по типу взаимодействия 2-го порядка [13].

По данным листовой диагностики оценили достаточность условий питания растений в разных вариантах опыта (табл. 2).

Определено существенное превышение содержания макроэлементов во всех вариантах опыта относительно контроля: в опыте с салатом содержание азота было больше на 16–32,

фосфора – на 6–59 и калия – на 4–16% (за исключением варианта 6), в опыте с мятой: азота – на 11–41, фосфора – на 20–111 (за исключением варианта 9) и калия – на 22–83%. Лучшие условия питания азотом для обеих культур были в варианте 6, что подтверждало содержание данного элемента в листьях салата, равное 130 и мяты – 141% относительно контроля. Оптимальные условия питания фосфором и калием были во всех вариантах опытов: для салата лучшим вариантом был № 9, для мяты – № 2 и № 5. У салата корневая система слаборазвита, поэтому свойства субстрата определяют развитие корневой системы и продуктивность растений. Листовая подкормка удобрениями позволяет выращивать растения, относящиеся к группе желто-зеленных культур, методом гидро- и аэропоники.

В питании растений очень важны микроэлементы. Например, цинк содержится почти во всех важных ферментах и влияет на образование ростовых веществ, накопление биомассы и стрессоустойчивость. В салате отмечено уменьшение содержания данного элемента в варианте 2, в листьях мяты – в вариантах 4–6, 8, 9 (табл. 3).

Медь входит в состав ферментов и увеличивает содержание хлорофилла, повышает устойчивость растений к грибным и бактериальным болезням. Уменьшение количества меди в листьях салата наблюдали в вариантах 2, 4, 5, мяты – в варианте 4. Установлено, что листовая подкормка и корневое внесение лигногумата (создание условий избыточного азотного питания) приводили к дефициту микроэлементов (меди и цинка) в зеленой культуре и лекарственном растении. Поэтому применение хелатных форм данных элементов необходимо для улучшения качества получаемой продукции.

Нитрат-ионы могут накапливаться в листьях культур за счет высокой концентрации азота в субстрате, что приводит к торможению активности

Таблица 2. Содержание макроэлементов в надземной биомассе растений, % от контроля

Вариант, №	Салат			Мята		
	азот	фосфор	калий	азот	фосфор	калий
1 (контроль)*	3.51	1.06	2.97	2.70	0.71	2.52
2	123	120	108	117	211	127
3	123	108	104	135	179	122
4	116	106	107	131	153	153
5	121	117	107	123	152	183
6	130	129	96	141	120	176
7	124	132	103	111	174	173
8	120	132	107	122	199	134
9	132	159	116	134	85	131

Примечание. Ошибка опыта составила $<10\%$. То же в табл. 3, 4.

* Фактическое содержание в контроле (% в сухом веществе), принятое за 100%. То же в табл. 3, 4.

Таблица 3. Содержание микроэлементов в надземной массе растений, мг/кг

Вариант, №	Салат		Мята	
	цинк	медь	цинк	медь
1 (контроль)*	54.8	1.6	44.5	4.1
2	90	63	100	117
3	114	177	107	159
4	106	53	89	95
5	107	90	91	100
6	110	183	98	141
7	106	205	104	144
8	131	256	88	120
9	121	238	86	100

каталазы. Данный фермент из класса оксидоредуктаз участвует в разрушении токсичного пероксида водорода, накапливаемого в клетках в процессе метаболизма. Во всех вариантах опыта отмечено высокое содержание нитратов в листьях салата в диапазоне от 5420 до 9240 мг/кг при ПДК для листовых овощей, равной 2000 мг/кг (СанПиН 2.3.2.1280-01). Наибольшее количество нитратов

в листьях салата относительно контроля было в вариантах 5–7, 9, где применяли лигноумат. Это позволило предположить, что листовое и совместное с корневым внесение лигноумата на зеленой культуре приводило к накоплению нитратов в листьях растений (рис. 2).

Мяту перечную используют для еды в небольших количествах, основная часть нитратов накапливается

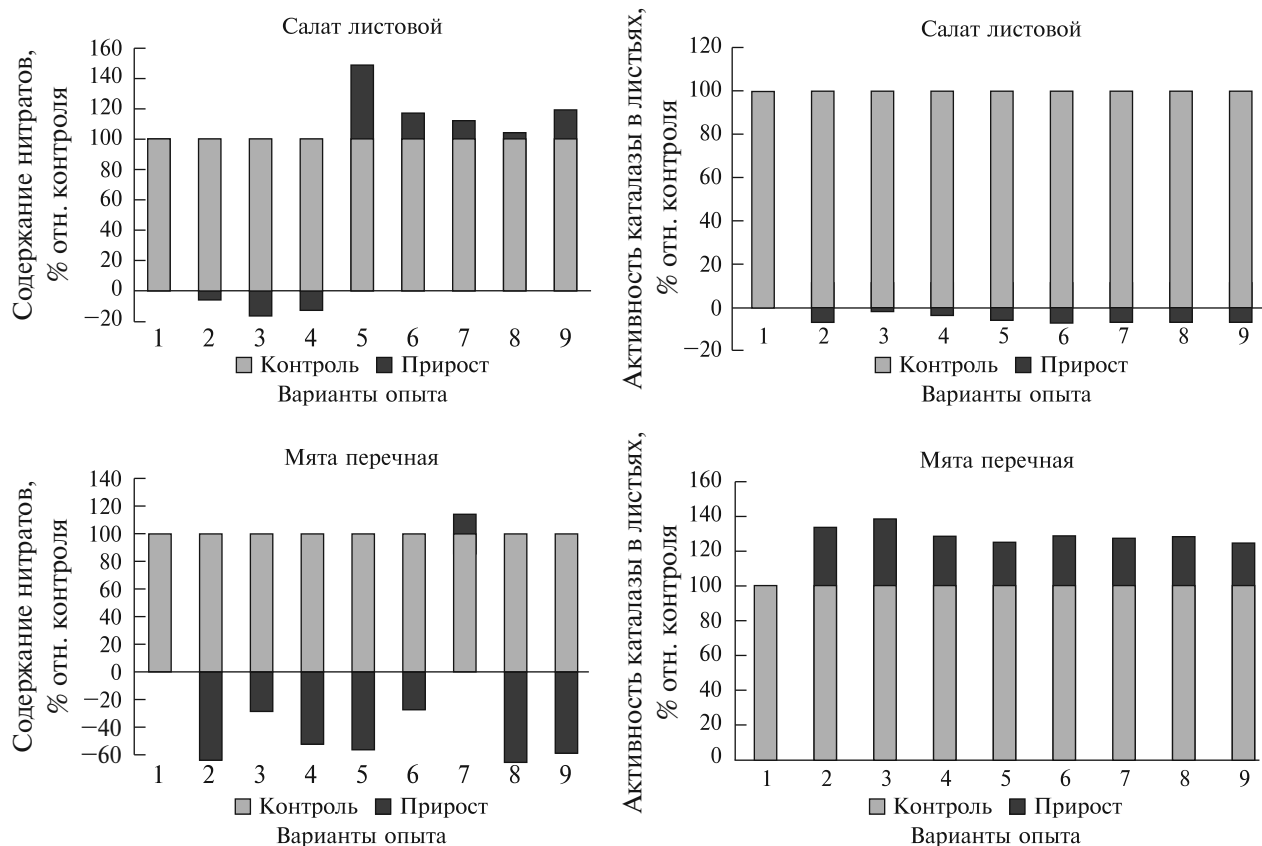


Рис. 2. Содержание нитратов и активность каталазы в сырой биомассе растений (в опыте с салатом: контроль – 6230 мг $\text{NO}_3^-/\text{кг}$ и 6.3 мг $\text{H}_2\text{O}_2/\text{г}$; с мятой – 3210 мг $\text{NO}_3^-/\text{кг}$ и 43.6 мг $\text{H}_2\text{O}_2/\text{г}$ соответственно).

Таблица 4. Содержание фотосинтетических пигментов в листьях растений, мг/г сырой массы

Вариант, №	Пигменты					
	1	2	3	1	2	3
	салат			мята		
Контроль*	0.205	0.077	0.094	0.581	1.69	0.616
2	109	106	101	203	69	119
3	85	77	90	204	60	120
4	75	70	86	202	55	117
5	116	119	101	206	77	121
6	90	91	97	210	54	122
7	99	88	100	208	63	122
8	69	64	78	210	52	122
9	113	108	104	208	61	122

Примечание. В графе 1 – хлорофилл *a*, 2 – хлорофилл *b*, 3 – каротиноиды.

в стеблях. Установлено превышение ПДК нитратов в листьях мяты в вариантах 3, 7 при листовой подкормке хелатными микроудобрениями с цинком и медью, а в варианте 6 – при совместном (корневом и листовом) внесении лигногумата (ПДК нитратов для мяты – 2000 мг/кг). Листовое применение хелатных удобрений не снимало проблему накопления нитратов в растительной продукции.

В листьях салата во всех вариантах опыта отмечено снижение активности каталазы на 4–7% по сравнению с контролем. В опыте с мятой выявлен обратный эффект, т.е. внесение любого удобрения разными способами повышало активность каталазы (на 24–38%) и, следовательно, происходило усиление дыхания с образованием токсичного для растений пероксида водорода, которого деактивировал данный фермент. Максимальный эффект в опыте с мятой отмечен при применении хелатных удобрений МЭ в варианте 3 и в вариантах 4, 5 с применением лигногумата.

Дополнительное применение удобрений в виде листовой подкормки вегетирующих растений влияло на процесс фотосинтеза (содержание хлорофиллов *a* и *b* и каротиноидов в листьях) и биомассу в целом. Отмечено снижение содержания хлорофилла *a* относительно контроля в листьях салата в вариантах 3, 4, 6, 7, 8, в листьях мяты этого не наблюдали (табл. 4).

Показано увеличение количества хлорофилла *b* в листьях салата, характеризующего стрессовое состояние растений в вариантах 2, 5, 9, в листьях мяты этого не отмечали. Повышение содержания каротиноидов указывало на степень зрелости листьев салата в варианте 9 и мяты – во всех вариантах опыта. Применение удобрений стимулировало постоянный рост растений салата, но в случае с совместным (корневым и листовым) внесением лигногумата и дополнительным внесением хелатных МЭ-удобрений содержание каротиноидов было

максимальным, что характеризовало не только созревание, но и старение растений. Биология мяты отлична от салата листового (однолетняя зеленая культура), поэтому высокое содержание каротиноидов и низкое содержание хлорофилла *b* в ее листьях можно считать положительным эффектом внесения изученных удобрений.

Данные опыта разбили на 2 группы: продуктивность и функциональность растений под влиянием удобрений. Для продуктивности выделены парные корреляционные зависимости: биология культуры и количество сырой биомассы ($r = 0.901, p < 0.050$), применение лигногумата и система удобрения ($r = 0.816$), биология культуры и усвоение цинка и азота ($r = -0.816... -0.872$), накопление влаги в растении и хелатное удобрение цинка ($r = 0.813$); для функциональности определены следующие парные корреляции: биология культуры и активность каталазы ($r = 0.992, p < 0.050$), содержание нитратов и хлорофилла *a* ($r < -0.900$), содержание нитратов и накопление влаги в листьях ($r = 0.850$) (табл. 5, 6).

При помощи прямого пошагового дискриминантного анализа были отобраны следующие наиболее значимые факторы, влиявшие на качество растительной продукции: биология культуры, прием удобрения, содержание элементов (азота, фосфора, калия, меди), применение лигногумата и содержание нитратов. Методами множественной регрессии установлено, что на накопление сырой биомассы основное влияние оказывал фактор биологии культуры – 37% (критерий $F = 15.999 > F_{кр} = 8.9, p < 0.00018$). Результаты анализа различий эффектов на основе статистики лямбда Уилкса показали, что главными переменными между вариантами опыта были биология растения, базовое удобрение (NPK) и лигногумат (критерий лямбда Уилкса составил 0.02748 , критерий $F = 18.25 > F_{кр} = 3.69, p < 0.0013$).

Таблица 5. Корреляционная матрица параметров продуктивности растений ($p < 0.050$, $n = 18$)

Показатель	Культура	Лигногумат	Удобрение	Влага в растении	Биомасса сырая	Биомасса сухая	Содержание					
							N	P	K	Zn	Cu	
Культура	1.000	0.000	0.000	-0.878	0.901	0.897	-0.816	-0.414	0.457	-0.872	0.744	
Лигногумат	0.000	1.000	0.816	-0.266	0.131	0.234	0.307	0.039	0.245	0.093	0.134	
Удобрение	0.000	0.816	1.000	-0.326	0.161	0.295	0.419	0.182	0.195	0.115	0.262	
Влага в растении	-0.878	-0.266	-0.326	1.000	-0.826	-0.993	0.578	0.313	-0.564	0.813	-0.689	
Биомасса сырая	0.901	0.131	0.161	-0.826	1.000	0.880	-0.645	-0.213	0.644	-0.685	0.822	
Биомасса сухая	0.897	0.234	0.295	-0.993	0.880	1.000	-0.600	-0.314	0.620	-0.811	0.720	
Содержание												
N	-0.816	0.307	0.419	0.578	-0.645	-0.600	1.000	0.444	-0.224	0.738	-0.462	
P	-0.414	0.039	0.182	0.313	-0.213	-0.314	0.444	1.000	-0.091	0.517	-0.008	
K	0.457	0.245	0.195	-0.564	0.644	0.620	-0.224	-0.091	1.000	-0.403	0.401	
Zn	-0.872	0.093	0.115	0.813	-0.685	-0.811	0.738	0.517	-0.403	1.000	-0.393	
Cu	0.744	0.134	0.262	-0.689	0.822	0.720	-0.462	-0.008	0.401	-0.393	1.000	

Таблица 6. Корреляционная матрица параметров функциональности растений ($p < 0.050$, $n = 18$)

Показатель	Культура	Лигногумат	Удобрение	Биомасса сырая	Содержание				
					нитратов	хлорофилла а	хлорофилла б	каротиноидов	Активность каталазы
Культура	1.000	0.000	0.000	0.901	-0.914	0.958	0.951	0.996	0.992
Лигногумат	0.000	1.000	0.816	0.131	0.030	0.079	-0.100	0.029	0.006
Удобрение	0.000	0.816	1.000	0.161	-0.023	0.124	-0.144	0.044	0.031
Биомасса сырая	0.901	0.131	0.161	1.000	-0.806	0.920	0.831	0.915	0.918
Содержание									
нитратов	-0.914	0.030	-0.023	-0.806	1.000	-0.900	-0.838	-0.917	-0.920
хлорофилла а	0.958	0.079	0.124	0.920	-0.900	1.000	0.837	0.980	0.982
хлорофилла б	0.951	-0.100	-0.144	0.831	-0.838	0.837	1.000	0.923	0.913
каротиноидов	0.996	0.029	0.044	0.915	-0.917	0.980	0.923	1.000	0.998
Активность каталазы	0.992	0.006	0.031	0.918	-0.920	0.982	0.913	0.998	1.000

ВЫВОДЫ

1. Установлено, что для салата листового (однолетней зеленой культуры) самым эффективным способом удобрения было совместное корневое и листовое внесение лигногумата. Для лекарственной многолетней культуры – мяты перечной применение лигногумата не оказало значимого действия на накопление дополнительной биомассы. Показано, что при выборе способов применения и типа удобрения было существенным влияние биологии культуры.

2. Установлено, что листовая подкормка лигногуматом и его корневое внесение формировало дефицит меди и цинка в листьях как зеленой культуры, так и лекарственного растения. Необходимо для улучшения качества получаемой растительной продукции дополнительно с внесением лигногумата применять хелатные формы микроэлементов с медью и цинком.

3. Сочность листьев и накопление влаги в салате и мяте зависело от содержания в торфяном субстрате соединений цинка, что подтверждал высокий положительный коэффициент корреляции между биологической влагой и дефицитом данного микроэлемента ($r = 0.8123$, $p < 0.050$).

4. Показано, что листовая обработка лигногуматом мяты снижала содержание нитратов в растениях. Для зеленных культур на примере салата корневое и совместное с корневым листовое внесение лигногумата существенно увеличивало содержание нитратов (превышение ПДК нитратов в 2.5–4.6 раза).

5. Листовое внесение лигногумата увеличивало содержание хлорофиллов *a* и *b* в листьях салата. В варианте с листовой обработкой лигногуматом в комбинации с хелатными МЭ отмечено наименьшее содержание каротиноидов в салате, что характеризовало продолжительный период активного роста культуры. Для многолетнего растения мяты перечной реакция пигментного комплекса была менее выраженной.

6. Самую низкую активность фермента каталазы отмечали в листьях салата в варианте совместного внесения (корневого и листового) лигногумата в комбинации с хелатными удобрениями меди и цинка. Данный фермент является природным биокатализатором, низкое содержание которого характеризует оптимальные условия для роста растений.

Выражаем благодарность коллегам отдела патологии садовых и декоративных культур ВНИИ фитопатологии: заведующей отделом патологии декоративных и садовых культур к.б.н. Серой Лидии Георгиевне и научному сотруднику Калембет Ирине Николаевне за помощь в подготовке посадочного материала (черенков мяты перечной), необходимо для проведения исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тугаринов Л.В., Гладков О.А. Лигногумат. Мифы и реальность // Агрохим. вестн. 2008. № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/lignogumat-mify-i-realnost> (дата обращения: 24.06.2023).
2. Ларина Г.Е. О почве для сада, питомника, озеленения. Метод. мат.-лы. Изд. 2-е, испр. и доп. Балашиха, 2023. 48 с.
3. Григорьева Е.Е. О гуминовых препаратах // ИАСЖ. 2020. № 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-guminovyh-preparatah> (дата обращения: 25.06.2023).
4. Гармаш Н.Ю., Гармаш Г.А. Методические подходы к оценке качества гуминовых препаратов // Агрохим. вестн. 2012. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodicheskie-podhody-k-otsenke-kachestva-guminovyh-preparatov> (дата обращения: 24.06.2023).
5. Koukal B., Gueguen C., Pardos M., Dominik J. Influence of humic substances on the toxic effects of cadmium and zinc to the green alga *Pseudokirchneriella subcapitata* // Chemosphere. 2003. V. 53. P. 953–961.
6. Верещагин А.Л., Рейзвих С.В. О возможности снижения фитотоксического действия тяжелых металлов при выращивании льна за счет применения стимуляторов роста // Новые достижения в химии и химической технологии растительного сырья. Барнаул: Изд-во Алтай. гос. ун-та, 2005. Кн. I. С. 666–669.
7. Минеев В.Г. Практикум по агрохимии. М.: Изд-во МГУ, 2001. 689 с.
8. Третьяков Н.Н., Карнаухова Т.В., Паничкин Л.А. Практикум по физиологии растений, 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1990. 271 с.
9. Плешков Б.П. Практикум по биохимии растений. М.: Колос, 1968. 256 с.
10. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта. М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
11. Борздова Т.В. Основы статистического анализа и обработка данных с применением Microsoft Excel. Минск: ГИУСТ БГУ, 2011. 75 с.
12. Минеев В.Г. Агрохимия, 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 2006. 720 с.
13. Гуреев И.И., Жердев М.Н., Брежнев А.Л., Черноногов В.Г., Солонищкин В.Н. Функциональная диагностика потребности растений в питательных веществах // Земледелие. 2015. № 4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/funktsionalnaya-diagnostika-potrebnosti-rasteniy-v-pitatelnyh-veschestvah> (дата обращения: 04.06.2023).

Influence of Different Methods of Application of Lignohumate on the Product Quality of Green Crops and Medicinal Plants

E. B. Pashkevich^{a,#}, G. E. Larina^b, M. V. Parachina^a

^a*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science,
Leninskie gory 1, bld. 12, GSP-1, Moscow 119991, Russia*

^b*All-Russian Scientific Research Institute of Phytopathology,
ul. Institute, posses. 5, Moscow region, Odintsovo district, r.p. Bolshye Vyazemy 143050, Russia*

[#]*E-mail: pashkevich05@list.ru*

The effectiveness of the use of lignohumate on lettuce (annual, green crop) and peppermint (perennial, medicinal plant) grown under the conditions of vegetation experiments was studied. The combination of lignohumate with the introduction of chelated fertilizers containing trace elements (zinc, copper) into peat showed a significant positive effect in obtaining high-quality plant products. The most effective was the fertilizer system, which included a combination of lignohumate with chelated forms of zinc and copper: the increase in lettuce biomass was 29–32, mint – 71–79%, the content of macro- and microelements in plants became optimal.

Keywords: fertilizers, humic preparation, lignohumate, green culture, medicinal plant, productivity, photosynthetic pigments, lettuce (*Lactuca sativa* L.), peppermint (*Mentha piperita* L.).

УДК 631.81:633.31./37:633.1:632.11:631.559(470.31)

ВЛИЯНИЕ УДОБРЕНИЯ, НОРМ ВЫСЕВА БОБОВОГО КОМПОНЕНТА И ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ НА УРОЖАЙНОСТЬ И НАКОПЛЕНИЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОСТАТКОВ ЛЮПИНО-ЗЛАКОВЫХ СМЕСЕЙ НА ЗЕРНО В ЦЕНТРЕ НЕЧЕРНОЗЕМЬЯ

© 2024 г. В. В. Конончук^{1,*}, С. М. Тимошенко¹, Т. О. Назарова¹, В. Д. Штырхунов¹, Е. А. Тулинова¹, Т. В. Смолина¹, Г. Б. Морозова¹, Е. А. Комиссарова²

¹Федеральный исследовательский центр “Немчиновка”
143026, Московская обл., г.п. Одинцово, р.п. Новоивановское, ул. Агротехников, 6, Россия

²Российский государственный аграрный заочный университет
143907 Балашиха, Московская обл., ул. Шоссе Энтузиастов, 50, Россия

*E-mail: vadimkononchuk@yandex.ru

На среднекультуренных среднесуглинистых дерново-подзолистых почвах Центрального Нечерноземья, хорошо обеспеченных подвижным фосфором и калием (IV–V класс), выращивание люпино-злаковых смесей на зерно с участием узколистного люпина сорта Ладный, пшеницы яровой, ячменя и овса сортов Немчиновской селекции после зерновых предшественников в условиях изменяющегося климата обеспечило получение зерна в среднем за 5 лет до 3.0–3.7 т/га с долей бобового компонента 29–57% и оставление в почве сухой массы растительных остатков до 6–8 т/га с накоплением в ней общего азота до 40–60 кг/га и биологического – 12–17 кг/га. В засушливых условиях (ГТК 0.80–0.92) по урожайности и массе растительных остатков в лучшую сторону выделялась смесь люпина с ячменем, при переувлажнении (ГТК = 2.47) – смеси с участием овса и яровой пшеницы. Включение в технологический процесс жидких микроудобрений органической природы со стимулирующим эффектом для некорневых подкормок снимало необходимость предпосевного внесения азотного удобрения и в условиях умеренной засушливости повышало урожайность зерна в зависимости от состава смеси до 3.9–4.9 т/га (на 53–59%), выход растительных остатков – до 7–11 т/га (на 54–139%), а в них – накопление симбиотически связанного азота – до 15–25 кг/га или в 5–8 раз больше, чем без их использования.

Ключевые слова: люпин, смешанные посевы, состав, погода, удобрение, растительные остатки, биологический азот.

DOI: 10.31857/S0002188124040084, EDN: dljcke

ВВЕДЕНИЕ

Российское земледелие на современном этапе функционирует в условиях дефицита органических удобрений и в первую очередь – навоза КРС в связи с медленным восстановлением поголовья. Использование для удобрительных целей птичьего помета и свиного навоза сопряжено с высокими затратами на их доработку применительно к требованиям ГОСТ.

Согласно статистике [1], в Нечерноземье на 1 га посева в 2022 г. было внесено органических удобрений всего 2.2 т/га, главным образом в виде торфа и продуктов его переработки. Поэтому в сохранении и воспроизводстве плодородия зональных почв существенно возрастает роль и значение

растительных остатков полевых культур. Их запашка позволяет от ротации к ротации севооборотов постепенно обновлять и наращивать содержание органического вещества в пахотном слое, усиливать биологическую активность почвы, улучшать показатели агрохимических свойств [2–5].

Скорость и степень минерализации растительных остатков определяется как климатическими условиями, так и качеством их органического вещества (соотношения C: N), которое в свою очередь тесно связано с его составом.

По данным исследований, проведенных в последние годы [6–8], в растительных остатках одновидовых посевов зернобобовых культур на зерно отношение C: N в среднем варьировало в диапазоне

(18–20): 1, в смешанных – расширилось до (25–31): 1, яровых зерновых – до (39–59): 1, озимых и кукурузы – до (53–61): 1. При этом за год после заделки соломы и пожнивно-корневых остатков минерализовалось 82, 77, 65 и 58%, гумификации подвергалось 18, 23, 35 и 42% соответственно.

Согласно этим и другим исследованиям [9–11], поступление в почву сухой массы растительных остатков однолетних бобово-злаковых смесей при выращивании на зерно в зависимости от состава, применения удобрений и почвенно-климатических условий изменялось в пределах 2.5–7.0 т/га и в сравнении с неудобренным контролем возрастало в среднем на 19–41%. С растительными остатками в почву возвращалось: общего азота – от 13–16 до 30–48 кг/га, фосфора – от 8–10 до 14–19 кг/га, калия – от 26–32 до 56–60 кг/га.

Приведенные материалы свидетельствуют о существенном возврате элементов питания в почву с растительными остатками однолетних бобово-злаковых смесей и о возможности его регулирования с помощью элементов агротехнологии. Применительно к люпино-злаковым смесям на зерно в условиях изменяющегося климата Нечерноземья технологические аспекты повышения продуктивности и накопления растительных остатков требует дальнейшего изучения. Цель работы – выявление особенностей влияния макро- и микроудобрений и норм высева люпина в смесях на урожайность зерна, массу растительных остатков и накопление элементов питания в ней при различных погодных условиях в Центре Нечерноземной зоны РФ.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования – люпино-злаковые смеси на зерно с участием однолетнего люпина детерминантного типа сорта Ладный, пшеницы яровой сортов Лиза (2018 г.), Агата (2019 г.), Злата (2020–2022 гг.), ячменя сортов Надежный (2018–2019 гг.), Златояр (2021 г.), Московский 86 (2020, 2022 гг.), пленчатого овса сорта Яков (2019–2020 г.), голозерного – сорта Азиль (2021–2022 гг.).

Исследование проводили в 2018–2022 гг. на опытном поле ФИЦ “Немчиновка”, расположенном в Новомосковском административном округе г. Москвы неподалеку от аэропорта “Внуково”, у населенного пункта Кривошеино в серии краткосрочных полевых опытов. Предшественник – яровые зерновые.

Почва – дерново-подзолистая среднесуглинистая на моренном суглинке. После уборки предшественника в пахотном слое 0–20 см в разные годы содержалось: гумуса – 1.4–2.1%, P_2O_5 и K_2O (по Кирсанову) – соответственно от 160–250 до 300–350 и от 130–160 до 180–220 мг/кг,

$pH_{КС1}$ – от 4.6–5.2 до 5.8–6.7 ед. с постепенным понижением от начала к концу исследования, H_T – от 0.94–1.90 до 2.30–3.50 мг-экв/100 г.

Схема двухфакторного опыта включала 2 варианта удобрения (фактор А) – РК, НРК и нормы высева люпина в смесях (фактор В) – 1.4–2.0 млн/га с шагом 0.2 млн/га. В настоящую работу включены результаты, полученные в вариантах с нормами высева 1.6 и 1.8 млн/га, проходящими через весь 5-летний цикл исследования.

Дозы P_2O_5 в разные годы варьировали в пределах 30–100 кг/га, K_2O – от 30 до 150 кг/га и в среднем за 5 лет составляли Р60К80. Их внесение с осени под зябь поддерживало обеспеченность пахотного слоя подвижным фосфором и калием на указанном выше уровне. Доза азота при предположительном внесении во все годы составляла 50 кг/га.

Система защитных мероприятий в смешанных посевах состояла из протравливания семян с использованием Фундазола, СП (2018–2019 гг.), ТМТД, ВСК + Табу, ВСК (2020–2021 гг.), Витарос, ВСК + Табу, ВСК (2022 г.) и двукратной обработки посевов в течение вегетации (фазы 2–3 пары листьев, бутонизация) баковой смесью из фунгицида Колосаль Про (2018–2021 гг.), Спирит, СК (2022 г.) и инсектицида Данадим, КЭ (2018 г.), Децис Профи, КЭ (2019 г.), Борей Нео, СК (2020–2022 гг.). Гербициды не применяли. Во все сроки использования пестицидов, включая протравливание семян, в баковую смесь добавляли жидкие микроудобрения органической природы с ростстимулирующим и антистрессовым эффектом: в 2018–2020 гг. – Гумистим Zn, В белорусского производства, в 2022 г. препараты, произведенные в ФРГ: при протравливании – Аминозол + Лебозол–Заатгут Микс, в период вегетации – Лебозол-Молибден (фаза 2–3 пары листьев) и Лебозол-Бор (фаза бутонизации), в 2021 г. ростостимуляторы не использовали. Во все годы в день посева семена люпина обрабатывали ризоторфином с активным штаммом N_2 -фиксирующих бактерий производства ВНИИСХМ (г. Пушкин Ленинградской обл.).

Посев проводили в лучшие агротехнические сроки сеялкой Amazone Д9. Пестициды и стимулирующие препараты в период вегетации вносили штанговым опрыскивателем Amazone с шириной захвата 12 м. Для вычленения действия последних в 2022 г. использовали результаты 2021 г., полученные без применения стимуляторов в сходных метеоусловиях.

Учет урожая зерна в фазе полной спелости (1–2 декада августа) – сплошной поделяночный селекционным комбайном Wintersteiger. Площадь делянки первого порядка – 192, второго – 64, учетная – 32 м², повторность четырехкратная.

При закладке полевых экспериментов, проведении учетов и наблюдений руководствовались рекомендациями [12–15].

Агрохимический анализ сухой массы соломы и пожнивно-корневых остатков (ПКО) выполняли в аккредитованной лаборатории массовых анализов института по методикам и ГОСТам, принятым в Агрохимической службе.

Метеорологические условия вегетационного периода от всходов до полной спелости зерна (1-я декада мая – 2-я декада августа) 2018–2022 гг. существенно отличались от средних многолетних показателей. При средней многолетней норме гидротермического коэффициента за указанный период, равной 1.48, в течение 4-х лет (2018–2019, 2021–2022 гг.) наблюдали проявление засушливости (ГТК составляла от 0.80 до 0.92), один год (2020 г.) характеризовался избыточным увлажнением (ГТК = 2.47), что оказывало влияние как на урожайность зерна, так и на накопление массы органического вещества растительных остатков.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что при средней за 5 лет урожайности зерна смешанных посевов различного состава, равной 3.05–3.71 т/га, с долей бобового компонента 29–57% сухая масса растительных остатков составляла 6.3–7.7 т/га с содержанием люпина 32–46% и включала солому, стерню на высоте среза 12–15 см и корни в слое 0–20 см с поправкой на полноту учета, равную 1.4 [15].

В среднем в вариантах удобрения и норм высева люпина в смесях в ней накапливалось: общего азота – от 37 до 59 кг/га и симбиотически

связанного – 9–17 кг/га. Возврат в почву фосфора составил 29–49, калия – 109–185 кг/га.

Наиболее высокими величинами возврата азота выделялись смешанные посевы люпина с яровой пшеницей и с пленчатым овсом, фосфора и калия – люпино-овсяные смеси (табл. 1).

С увеличением влагообеспеченности посевов (ГТК = от 0.92 до 2.47) смеси люпина с пшеницей и овсом увеличивали не только урожайность зерна в среднем на 28 и 61%, но и размеры накопления сухой массы растительных остатков на 66 и 111% за счет роста доли злакового компонента в основной и побочной продукции соответственно в среднем с 50–70 до 66–72% и с 55–66 до 71–75%, а в ней – накопления элементов питания: фосфора – в 3.1–3.4 раза (с 21–27 до 66–92 кг/га), калия – в 2.3–2.6 раза (с 88–109 до 204–282 кг/га). В значительно меньшей степени возрастало накопление азота – на 10% в соломе и ПКО люпино-пшеничной смеси и на 68% – смеси люпина с овсом. Размеры накопления фиксированного азота, в отличие от $N_{\text{общ}}$, под влиянием избыточного увлажнения уменьшались на 57–79% и не превышали 5–6 кг/га вследствие отрицательного влияния последнего на процесс N_2 -фиксации [16].

Смесь люпина с ячменем иначе реагировала на повышение уровня увлажнения в течение вегетации. Из-за негативной реакции обоих компонентов на чрезмерное выпадение осадков отмечено снижение урожайности зерна в среднем с 3.60 до 2.67 т/га (на 26%). В то же время масса растительных остатков увеличивалась на 12%, а в ней – накопление P_2O_5 и K_2O на 96 и 50% соответственно. Размеры накопления общего азота также возрастали на 34% или в среднем с 38

Таблица 1. Влияние состава люпино-злаковых смесей на урожайность зерна, массу растительных остатков и накопление в ней элементов питания (среднегодовые величины)

Показатель	Состав смесей				
	люпин + пшеница яровая (2018–2020 гг.)	люпин + ячмень (2019–2022 гг.)	люпин + овес		
			пленчатый (2019–2020 гг.)	голозерный** (2021–2022 гг.)	
Урожайность зерна*	<u>3.05</u> 31	<u>3.71</u> 35	<u>3.43</u> 29	<u>3.34</u> 57	
Масса растительных остатков*	<u>7.0</u> 40	<u>6.3</u> 34	<u>7.3</u> 32	<u>7.7</u> 46	
Накопление в растительных остатках, кг/га	N**	<u>59</u> 17	<u>42</u> 9	<u>54</u> 12	<u>37</u> 14
		P ₂ O ₅	36	29	49
	K ₂ O	127	109	167	185

* Над чертой – т/га, под чертой – доля бобового компонента, %.

** Над чертой – N биологический, кг/га, под чертой – его доля, % от общего азота. То же в табл. 2–5.

до 51 кг/га, но доля биологического азота сокращалась с 29 до 0%, что также было проявлением негативного влияния переувлажнения на азотфиксацию (табл. 2).

Следовательно, условия переувлажнения лучше переносили смеси люпина с яровой пшеницей и овсом, обеспечивая рост урожайности зерна, накопление массы растительных остатков и размеров возврата элементов питания в почву, кроме симбиотического азота, поступление которого при этом уменьшалось. Поэтому в отсутствие достоверного долгосрочного прогноза погоды на весенне-летний период для повышения стабильности зерновой продуктивности и поступления в почву растительных остатков необходимо расширение видового разнообразия смешанных посевов, в том числе и с привлечением наиболее устойчивых видов яровых зерновых культур.

Необходимо отметить, что некорневые подкормки жидкими комплексными удобрениями органической природы с ростстимулирующим и антистрессовым эффектом в засушливом 2022 г. (ГТК = 0.80) приводили к росту не только урожайности зерносмеси с участием ячменя в сравнении с предыдущим годом (ГТК = 0.92), когда их не применяли (прибавка 32%), но и повышали массу растительных остатков в среднем на 33%. Накопление в ней элементов питания также возрастало: N – с 25

до 41 кг/га (на 60%), в том числе биологического – от 0 до 14 кг/га, K₂O – с 76 до 152 кг/га (на 100%).

Влияние предпосевного внесения азота на урожайность зерна, накопление растительных остатков, а в них – элементов питания в годы исследования соответствовало погодным условиям года, определявшим интенсивность азотфиксации в смешанном агроценозе и нитрификации в почве.

Когда в период формирования и развития бобово-ризобияльного симбиоза погода не благоприятствовала нитрификации (2018, 2019 гг.) вследствие недостаточного увлажнения и повышенного или пониженного (2019 г.) температурного режима, азот удобрений обеспечивал увеличение накопления растительных остатков, общего и фиксированного из атмосферы азота в сухой массе. Наиболее выражено это было в смешанном посеве люпина с пленчатой формой овса (прибавка 54 и 42%, или от 35 до 54 и от 12 до 17 кг/га соответственно). Возврат в почву P₂O₅ также возрастал на 46, K₂O – на 32%, или от 22 и 94 до 32 и 124 кг/га соответственно.

Если же погодные условия способствовали нитрификации, и уровень запасов N-NO₃ в корнеобитаемом слое 0–60 см почвы на естественном азотном фоне в начале бутонизации люпина достигал 60–80 кг/га, а при внесении NPK увеличивался до 180–240 кг/га (2021 г.), то азотфиксация

Таблица 2. Влияние влагообеспеченности люпино-злаковых смесей на сбор сухой массы растительных остатков и накопление элементов питания (среднее вариантов с удобрениями и норм высева люпина)

Состав смесей	Год, ГТК за май – первую половину вегетации	Показатели				
		урожайность зерна, т/га	сухая масса растительных остатков, т/га	накоплено в растительных остатках, кг/га		
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Люпин + пшеница яровая	2018–2019, 0.86–0.92	<u>3.05</u> 50	<u>5.8</u> 45	<u>57</u> 23	21	88
	2020, 2.47	<u>3.89</u> 34	<u>9.6</u> 29	<u>63</u> 5	66	204
Люпин + овес пленчатый	2019, 2021, 0.92	<u>2.85</u> 30	<u>5.3</u> 35	<u>44</u> 14	27	109
	2020, 2.47	<u>4.58</u> 28	<u>11.2</u> 25	<u>74</u> 6	92	282
Люпин + ячмень	2019, 2021, 0.92	<u>3.60</u> 34	<u>5.6</u> 31	<u>38</u> 11	24	78
	2021, 0.92	<u>3.79</u> 34	<u>5.7</u> 30	<u>25</u> 0	22	76
	2022, 0.80	<u>4.99</u> 36	<u>7.4</u> 37	<u>40</u> 14	22	164
	2020, 2.47	<u>2.67</u> 37	<u>6.3</u> 35	<u>51</u> 0	47	117

Таблица 3. Влияние азота удобрений на урожайность зерна люпино-злаковых смесей, накопление растительных остатков и элементов питания в них в засушливых условиях (среднее вариантов норм высева люпина в смесях)

ГТК	Вариант удобрения NPK, кг/га (фактор А)	Состав смесей, год	Урожайность зерна	HCP ₀₅	Растительные остатки	Накоплено в растительных остатках, кг/га		
						N	P ₂ O ₅	K ₂ O
0.86–0.92	P60K80	Люпин + пшеница яровая, 2018, 2019	<u>3.12</u> 56		<u>5.8</u> 50	<u>51</u> 22	20	91
		Люпин + овес пленчатый, 2019, 2021	<u>2.71</u> 34		<u>4.6</u> 36	<u>35</u> 12	22	94
		Люпин + ячмень, 2019	<u>3.48</u> 43		<u>5.5</u> 38	<u>44</u> 20	26	76
	N50P60K80	Люпин + пшеница яровая, 2018, 2019	<u>2.92</u> 44	0.22	<u>5.8</u> 40	<u>63</u> 24	22	84
		Люпин + овес пленчатый, 2019, 2021	<u>2.99</u> 26	0.23	<u>6.0</u> 34	<u>54</u> 17	32	124
		Люпин + ячмень, 2019	<u>3.31</u> 26	0.35	<u>5.6</u> 26	<u>58</u> 24	24	82
0.92	P60K80	Люпин + овес голозерный, 2021	<u>2.45</u> 62		<u>4.6</u> 42	<u>16</u> 3	26	92
		Люпин + ячмень, 2021	<u>3.22</u> 42		<u>4.8</u> 32	<u>18</u> 3	19	72
	N50P60K80	Люпин + овес голозерный, 2021	<u>2.64</u> 45	0.22	<u>5.5</u> 52	<u>22</u> 3	25	110
		Люпин + ячмень, 2021	<u>4.36</u> 28	0.24	<u>6.6</u> 29	<u>28</u> 1	24	79
	P60K80	Люпин + овес голозерный, 2022	<u>3.89</u> 64		<u>10.6</u> 54	<u>56</u> 25	42	272
		Люпин + ячмень, 2022	<u>4.92</u> 46		<u>7.0</u> 50	<u>45</u> 15	22	157
0.80	N50P60K80	Люпин + овес голозерный, 2022	<u>3.86</u> 65	0.32	<u>9.2</u> 38	<u>54</u> 22	28	224
		Люпин + ячмень, 2022	<u>5.06</u> 26	0.39	<u>8.7</u> 23	<u>38</u> 14	20	150

прекращалась, и при положительном влиянии азота удобрений на урожайность и массу растительных остатков (прибавка 8–35 и 20–38% соответственно) в зависимости от состава, в последних накапливалось общего азота 16–28 кг/га и симбиотически связанного – 1–3 кг/га (табл. 3).

В несколько более жестких условиях увлажнения вегетационного периода 2022 г. (ГТК = 0.80), при повышении зерновой продуктивности и накопления растительных остатков на фоне трехкратного применения жидких биологически активных микроудобрений (с протравителем и 2 раза в период вегетации), направленность и степень воздействия азота удобрений на комплекс рассмотренных

показателей определялись видовым составом смешанных посевов. У смеси с участием ячменя под влиянием предпосевного внесения N50 урожайность зерна и масса растительных остатков увеличивались на 3 и 24% соответственно за счет увеличения доли злакового компонента в продукции на 20 и 27%. Это способствовало снижению накопления азота в ПКО с 45 до 38 кг/га (на 16%) при близких показателях для биологического азота. Аккумуляция P₂O₅ и K₂O в биомассе изменялась слабо. В смешанном посеве с голозерной формой овса азот удобрений не оказывал влияния на урожайность, но снижал массу растительных остатков на 13%, накопление в ней элементов питания – на 12–33% в зависимости от показателя.

Таблица 4. Влияние азота удобрений и норм высева люпина в смесях на урожайность зерна, накопление растительных остатков и элементов питания в них при избыточном увлажнении (среднее факторов, кроме изученного, 2020 г.)

Состав смесей	Удобрение (фактор А), кг/га							Нормы высева люпина (фактор Б), млн/га						
	варианты	урожайность, т/га	НСР ₀₅ , т/га	масса растительных остатков, т/га	накопление в растительных остатках, кг/га			варианты	урожайность, т/га	НСР ₀₅ , т/га	масса растительных остатков, т/га	накопление в растительных остатках, кг/га		
					N	P ₂ O ₅	K ₂ O					N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Люпин + пшеница яровая	P60K80	<u>3.32</u> 54	0.36	<u>7.96</u> 37	<u>64</u> 5	37	118	1.6	<u>3.86</u> 38	0.44	<u>9.28</u> 32	<u>60</u> 5	37	141
	N50P60K80	<u>4.46</u> 14		<u>10.7</u> 21	<u>63</u> 4	47	169	1.8	<u>3.92</u> 30		<u>9.41</u> 26	<u>66</u> 4	46	145
Люпин + овес пленчатый	P60K80	<u>4.16</u> 32	0.43	<u>9.96</u> 20	<u>63</u> 3	81	123	1.6	<u>4.38</u> 28	0.52	<u>10.3</u> 26	<u>59</u> 6	83	254
	N50P60K80	<u>5.00</u> 23		<u>12.3</u> 28	<u>72</u> 6	101	316	1.8	<u>4.78</u> 28		<u>12.0</u> 23	<u>76</u> 3	98	307
Люпин + ячмень	P60K80	<u>2.31</u> 46	0.30	<u>5.42</u> 40	<u>46</u> 0	43	108	1.6	<u>2.66</u> 48	0.36	<u>6.06</u> 42	<u>51</u> 0	39	116
	N50P60K80	<u>2.98</u> 32		<u>7.20</u> 29	<u>56</u> 0	51	126	1.8	<u>2.63</u> 28		<u>6.58</u> 28	<u>51</u> 0	54	118

Таким образом, использование жидких комплексных биологически активных микроудобрений совместно со средствами защиты растений в условиях умеренной засухливости оказывало положительное влияние на величины рассмотренных показателей в сравнении с необработанным посевом (2021 г.), снимало необходимость применения азотного удобрения, тем самым придавая больше устойчивости экологии агрофитоценоза и прилегающих территорий.

В то же время при избыточном увлажнении (ГТК = 2.47, 2020 г.) внесение N50 перед посевом оказывало выраженное положительное влияние на размеры урожайности зерна (прибавка 20–34%), массу растительных остатков (прибавка 24–35%), накопление P₂O₅ и K₂O в них (на 19–27 и 17–157% соответственно) в зависимости от состава (табл. 4).

В этих условиях наибольшей урожайностью и размерами накопления растительных остатков выделялись смешанные посевы люпина с яровой пшеницей (4.46 и 10.7 т/га) и с пленчатым овсом (5.00 и 12.3 т/га), при доле бобового компонента в них 11 и 23, 21 и 28% соответственно.

Наименьшими показателями характеризовалась смесь люпина с ячменем, где оба компонента проявляли отрицательную реакцию на переувлажнение.

На фоне N50P60K80 она обеспечивала получение зерна 2.98 т/га (прибавка 29%) и выход растительных остатков порядка 7 т/га (прибавка 33%) при доле бобового компонента в них 32 и 29%, или уменьшение на 14 и 11% соответственно в сравнении с фоном РК.

Направленность изменения уровней накопления общего азота в растительных остатках изученных люпино-злаковых смесей под влиянием азота удобрений при этом не подчинялась отмеченным выше закономерностям и находилась в соответствии с их составом. Если смесь люпина с яровой пшеницей не реагировала на предпосевное внесение азота (64 и 63 кг/га), то у смесей с участием пленчатого овса и ячменя отмечена положительная реакция прибавка 9 и 10 кг/га, или на 14 и 22%) при максимальном накоплении 72 и 56 кг N/га. При очень низкой азотфиксации или ее отсутствии в условиях избытка влаги, очевидно в связи с недостатком кислорода в ризосфере, накопление фиксированного из атмосферы азота в растительных остатках находилось в пределах от 0–3 до 4–6 кг/га. В связи с этим, необходимо продолжать исследование по поиску технологических решений, направленных на улучшение условий для азотфиксации в смешанных однолетних бобово-злаковых агрофитоценозах в стрессовых ситуациях, связанных с переувлажнением. Одним из них может стать использование листовой обработки растений

Таблица 5. Влияние норм высева люпина на урожайность зерна смешанных посевов, накопление растительных остатков и элементов питания в них при недостаточном увлажнении. Среднее по факторам, кроме изучаемого

ГТК	Норма высева люпина, млн семян/га	Состав смесей, год	Урожайность зерна, т/га	НСР ₀₅ , т/га	Растительные остатки, т/га	Накоплено в растительных остатках, кг/га				
						N	P ₂ O ₅	K ₂ O		
0.92	1.6	Люпин + пшеница яровая, 2018, 2019	<u>2.95</u> 49	0.26	<u>6.11</u> 44	<u>53</u> 24	23	92		
		Люпин + овес пленчатый, 2019, 2021	<u>2.89</u> 31		<u>5.35</u> 31	<u>42</u> 14			28	113
		Люпин + ячмень, 2019, 2021	<u>3.54</u> 33		<u>5.12</u> 33	<u>45</u> 20				
	1.8	Люпин + пшеница яровая, 2018, 2019	<u>3.10</u> 51	0.23	<u>5.45</u> 56	<u>49</u> 25	19	89		
		Люпин + овес пленчатый, 2019, 2021	<u>2.81</u> 29		<u>5.21</u> 32	<u>47</u> 16			26	105
		Люпин + ячмень, 2019, 2021	<u>3.64</u> 36		<u>6.06</u> 22	<u>58</u> 24				
0.80	1.6	Люпин + овес голозерный, 2022	<u>4.02</u> 66	0.29	<u>11.50</u> 44	<u>65</u> 29	37	306		
		Люпин + ячмень	<u>4.94</u> 27		<u>7.50</u> 36	<u>44</u> 14			22	160
	1.8	Люпин + овес голозерный, 2022	<u>3.72</u> 62		0.54	<u>8.40</u> 48	<u>44</u> 18	32		
		Люпин + ячмень	<u>5.03</u> 45			<u>7.20</u> 38	<u>38</u> 14		20	148

ростстимуляторами и антистрессантами до 2-х раз за вегетацию. Но этот вопрос требует дальнейшего изучения.

Влияние норм высева люпина в смесях на урожайность, накопление растительных остатков и возврат элементов питания в почву находилось в соответствии с их видовым составом и погодными условиями периода вегетации.

При избыточном увлажнении только люпино-овсяная смесь проявляла хорошо выраженную положительную реакцию на увеличение нормы высева люпина (от 1.6 до 1,8 млн семян/га), повышая урожайность на 9, сбор сухой массы пожнивно-корневых остатков и соломы – на 16%, а в ней – общего азота на 29, P₂O₅ и K₂O – на 18 и 21% соответственно. Но доля биологического азота в биомассе ПКО оставалась низкой (3–6 кг/га или 4–11% от общего накопления).

У смесей люпина с яровой пшеницей и с ячменем проявлялась лишь тенденция к увеличению рассмотренных показателей в отсутствие накопления N_{биол} в растительных остатках.

В условиях умеренной засушливости (ГТК = 0.86–0.92) только в смешанном посеве с участием ячменя с ростом нормы высева люпина наблюдали увеличение урожайности и сбора растительных остатков на 3 и 11%, накопления N, P₂O₅ и K₂O в ней на 29, 33 и 31% соответственно. В люпино-пшеничном и люпино-овсяном (пленчатая форма) агрофитоценозах прослежено в основном слабо выраженное отрицательное влияние, возможно связанное с усилением конкуренции компонентов за влагу: изменение урожайности на 3–5%, массы растительных остатков – на 2–11%, накопления в них P₂O₅ и K₂O – на 7–17 и –3–7% соответственно, что свидетельствовало в пользу меньшей нормы высева. Отмеченная тенденция сохранялась и в посевах, дважды обработанных в период вегетации стимулирующими препаратами. При более высокой продуктивности и накоплении растительных остатков в сравнении с необработанными посевами в вариантах с нормой высева люпина 1.6 млн семян/га в пожнивно-корневых остатках накапливалось больше элементов питания: от 8–16 до 48–62% в зависимости от показателя, особенно это было заметно в смешанном посеве люпина с голозерным овсом (табл. 5).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в условиях глобального потепления, проявляющегося в Нечерноземье через учащение чередования сухих и влажных периодов в течение одной вегетации, повышение и стабилизация урожайности зерна, поступления в почву растительных остатков может быть достигнута только путем расширения биологического разнообразия смешанных люпино-злаковых агрофитоценозов с включением в них видов и сортов яровых зерновых культур, близких бобовому компоненту по темпам развития и наступления фенологических фаз.

На среднекультуренных дерново-подзолистых почвах с достаточной обеспеченностью подвижным фосфором (III–V класс по принятым градациям) и широким диапазоном pH зерновая продуктивность от 2.5–3.0 до 3.5–5.0 т/га и оставление в почве сухой массы послеуборочных остатков до 6–8 т/га, включая корни в слое 0–20 см, в засушливых условиях обеспечивалась посевом с нормой высева люпина 1.6 млн семян/га, зерновых – 50–60% от полной нормы высева на фоне применения Р60К80 в среднем в год без внесения минеральных азотных удобрений и при проведении 2-х листовых подкормок жидкими микроудобрениями органической природы стимулирующего характера совместно с инсекто-фунгицидной защитой растений. Это обеспечивало приход в почву азота: общего – 40–60 и биологического – 15–30 кг/га. При переувлажнении отмеченный уровень урожайности с выходом сухой массы растительных остатков 7–12 т/га создавался применением полного минерального удобрения со среднегодовыми дозами N50P60K80, что обеспечивало поступление в почву общего азота до 60–70 и биологического – только до 3–6 кг/га. В дальнейшем поиск технологических решений по улучшению условий азотфиксации и формирования продуктивности смешанных люпино-злаковых посевов в условиях водного стресса необходимо продолжать с использованием новейших отечественных и зарубежных разработок в области применения антистрессовых и ростстимулирующих препаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Внесение удобрений под урожай 2022 года и проведение работ по химической мелиорации земель [Электр. ресурс] // Федеральная служба Государственной статистики (РОССТАТ), Главный Межрегиональный Центр. М., 2023. 17 с. (rosstat.gov.ru>storage...Vnesen_udobren_2022.xlsx).
2. Цыганов А.Р., Персикова Т.Ф. Вклад органического вещества культур севооборота в плодородие почвы // Современные проблемы использования почв и повышения эффективности удобрений: Мат-лы Междунар. науч.-практ. конф. (Горки, 24–26 октября 2001 г.) Горки: БГСХА, 2001. Ч. 2. С. 190–194.
3. Шрамко Н.В., Вихорева Г.В. Роль бобовых трав в изменении гумусированности дерново-подзолистых почв Верхневолжья // Зернобоб. и круп. Культуры. 2016. № 3(19). С. 125–132.
4. Замятин С.А., Измествев В.М. Влияние культур севооборота на среднегодовое поступление растительных остатков за ротацию севооборотов // Вестн. Марий. Гос. ун-та. Сер. Сел.-хоз. науки. Эконом. науки. 2016. № 1(5). С. 18–21.
5. Трусов В.И., Гармашов В.М., Тесмина В.Е., Дьячнова Т.И., Абанина О.А., Михина Т.И., Дронова Н.В. Севооборот как средство воспроизводства возобновляемых биоресурсов органического вещества почвы // Высокоэффективные системы использования органических удобрений и возобновляемых биологических ресурсов. Сб. докл. коорд. совещ. М.: РАСХН–ВНИИОУ, 2012. С. 174–177.
6. Замятин С.А., Ефимова А.Ю., Максюткин С.А. Влияние полевых севооборотов на накопление пожнивно-корневых остатков в пахотном слое дерново-подзолистой почвы [Электр. ресурс] // Аграрн. наука Евро-Северо-Востока. 2019. № 20(6). С. 594–601. <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2019.20.6.594-601>
7. Бурлака В.А. Обоснование агроинженерно-мелиоративных приемов повышения плодородия черноземов и продуктивности полевых культур: Автореф. дис. ... д-а с.-х. наук. Пенза, 2006. 48 с.
8. Новиков А.А., Кисаров О.П. Обоснование роли корневых и пожнивных остатков в агроценозах [Электр. ресурс] // Научн. журн. Куб ГАУ. 2012. № 78(04). С. 1–10. <http://ej.kubagro.ru/2012/04/pdf/36.pdf>
9. Мельникова О.В., Ториков В.Е., Москалева В.А. О значении возделывания однолетних зернобобовых культур в условиях биологизации земледелия // Вестн. Брянск. ГСХА. 2011. № 3. С. 15–19.
10. Безгодова И.Л., Коновалова Н.Ю., Прядильщикова Е.Н., Благовещенская Г.Г., Завалин А.А. Урожайность и качество зерна одновидового и смешанных посевов гороха при внесении минеральных удобрений // Достиж. науки и техн. АПК. 2016. Т. 30. № 7. С. 75–79.
11. Чадаев И.М., Гурин А.Г. Аккумуляция элементов питания зернобобовыми культурами, используемыми в качестве предшественника // Зернобоб. и круп. Культуры. 2020. № 1(33). С. 59–63. <https://doi.org/10.24411/2309-348X-2020-11157>
12. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). М.: Колос, 1973. 335 с.

13. Федин М.А. Методика государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур. М.: Агропромиздат, 1985. 263 с.
14. Станков Н.З. Корневая система полевых культур. М.: Колос, 1964. 279 с.
15. Трещачев Е.П. Агрохимические аспекты биологического азота в современном земледелии. М.: Агроконсалт, 1999. 532 с.
16. Конончук В.В., Никиточкин Д.Н., Тимошенко С.М., Штырхунув В.Д., Назарова Т.О. Влияние элементов агротехнологии возделывания люпинозлаковых смесей на азотфиксирующую способность и продуктивность в зависимости от метеорологических условий в Центральном Нечерноземье // *Зернобоб. и круп. культуры*. 2021. № 3(39). С. 107–118.

Effect of Fertilizers, Seeding Rates of the Legume Component and Weather Conditions on Yield and Accumulation of Plant Residues of Lupine-Cereal Mixtures on Grain in the Center of the Non-Chernozem Region

V. V. Kononchuk^{a, #}, S. M. Timoshenko^a, T. O. Nazarova^a, V. D. Shtyrkhunov^a, E. A. Tulinova^a, T. V. Smolina^a, G. B. Morozova^a, E. A. Komissarova^b

^aFederal Research Center "Nemchinovka",
ul. Agrochemikov 6, Moscow region, Odintsovo, r.p. Novoivanovskoye 143026, Russia

^bRussian State Agrarian Correspondence University,
Shosse Entuzjastov 50, Moscow region, Balashikha 143907, Russia

[#]E-mail: vadimkononchuk@yandex.ru

On medium-cultivated medium-loamy sod-podzolic soils of the Central Non-Chernozem region, well provided with mobile phosphorus and potassium (IV–V class), the cultivation of lupine–cereal mixtures for grain with the participation of narrow-leaved lupine varieties Ladny, spring wheat, barley and oats varieties of Nemchin breeding after grain precursors in a changing climate ensured grain production in an average of 5 up to 3.0–3.7 t/ha with a share of the legume component of 29–57% and the remaining dry mass of plant residues in the soil up to 6–8 t/ha with the accumulation of total nitrogen in it up to 40–60 kg/ha and biological – 12–17 kg/ha. In arid conditions (GTK = 0.80–0.92), a mixture of lupine and barley was distinguished for the better in terms of yield and weight of plant residues, and in case of waterlogging (GTK = 2.47) – mixtures with oats and spring wheat. The inclusion of liquid micronutrients of organic nature in the technological process with a stimulating effect for non-root top dressing eliminated the need for pre-sowing application of nitrogen fertilizer and, in conditions of moderate aridity, increased grain yield, depending on the composition of the mixture, to 3.9–4.9 t/ha (by 53–59%), the yield of plant residues – up to 7–11 t/ha (by 54–139%) and in them there is an accumulation of symbiotically bound nitrogen – up to 15–25 kg/ha or 5–8 times more than without their use.

Keywords: lupin, mixed crops, composition, weather, fertilizer, plant residues, biological nitrogen.

УДК 631.417.2(571.54)

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ И СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГУМИНОВЫХ КИСЛОТ ПОЙМЕННЫХ ПОЧВ ДЕЛЬТЫ РЕКИ СЕЛЕНГИ

© 2024 г. Е. Ю. Мильхеев^{1,*}, Н. Д. Балданов²¹Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН
670047 Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6, Россия²Бурятская ГСХА им. В.Р. Филиппова
670047 Улан-Удэ, ул. Пушкина, 8, Россия

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

Проведено исследование элементного состава и структуры гуминовых кислот пойменных почв дельты р. Селенга (Западное Забайкалье). Район исследований относится к дельтовому лугово-болотному и лесостепному району, который представляет собой территорию, где активно идут отложения песчаных и илстых фракций, приносимых со всего бассейна. Здесь почвы и растительность являются природными биофильтрами. В зависимости от биоклиматических условий, режимов грунтовых вод, состава отложений формируются почвы, различающиеся составом гумуса и гуминовых кислот (ГК). В качестве объектов исследований служили аллювиальные (луговые, лугово-болотные, луговые солончаковатые) почвы дельты Селенги, по классификации WRB – Fluvisols. Анализ ¹³C-ЯМР-спектров препаратов ГК исследованных пойменных почв позволил выделить диапазоны химических сдвигов, принадлежащих атомам углерода различных функциональных групп и молекулярных фрагментов. Данные ЯМР-спектроскопии показали, что гуминовые кислоты аллювиальной луговой почвы более обогащены ароматическими фрагментами, чем гуминовые кислоты лугово-болотных и луговых солончаковатых почв. Несколько большая степень ароматичности в аллювиальной луговой и лугово-болотной почве связана с экологическими условиями и компонентным составом предшественников гумификации. Возрастание доли алифатических структур и снижение доли ароматических фрагментов в составе препаратов ГК луговой солончаковой почвы позволяют судить об упрощении строения гуминовой кислоты. Грунтовое увлажнение в совокупности с засолением заметно снижает скорость трансформации почвенного органического вещества (ПОВ) и приводит к увеличению доли неокисленных алифатических фрагментов. Применение ЯМР-спектроскопии при изучении ПОВ существенно расширило представления о его составе и структуре, углубило понимание механизмов гумификации и трансформации почв различного генезиса.

Ключевые слова: Fluvisols, аллювиальные почвы, дельта р. Селенги, гуминовые кислоты.

DOI: 10.31857/S0002188124040099, **EDN:** dlhset

ВВЕДЕНИЕ

Гумусовые вещества (ГВ) являются доминирующими компонентами органического вещества большинства минеральных почв (60–80%) и играют ключевую роль в экологической устойчивости, благодаря их вкладу в биологические, химические и физические свойства почвы. ГВ образуются в результате разложения и последующей полимеризации органических остатков растительного и животного происхождения, что приводит к образованию гетерогенных супрамолекулярных частиц с большой молекулярной массой [1], содержащих различные функциональные группы, состав и свойства которых различаются в зависимости от источника

почвенного органического вещества (ПОВ) и биоклиматических условий [2]. Происхождение, состав и структурные особенности ГВ до сих пор являются предметом интенсивных дискуссий и даже споров [3–8]. С физико-химической точки зрения ГВ представляют собой молекулярные агрегаты, состоящие из сахаров, жирных кислот, полипептидов, алифатических цепей и ароматических колец [9], а в работе [10] они описываются как континуум биомолекул на разных стадиях деградации.

Важным шагом к пониманию реакционной способности, свойств и функций гуминовых кислот (ГК) является определение их состава и функциональных групп, что чрезвычайно сложно из-за

структурной неоднородности почвенного ОВ. Для исследования структуры ГК используют различные методы, включая химическое и термическое разложение, спектроскопические методы [11–13]. Хотя химические и термические методы могут дать структурную информацию о субъединицах и их структуре, эти данные могут быть нерепрезентативными и их трудно напрямую связать с исходной структурой ПОВ. Многие спектроскопические методы, такие как инфракрасная, флуоресцентная и спектроскопия ядерного магнитного резонанса (ЯМР), применяли к изучению ГК [14–15]. Было установлено, что неразрушающие спектроскопические анализы, такие как ЯМР-спектроскопия, являются наилучшим выбором, чем деструктивные подходы [16, 17].

По сравнению с другими спектроскопическими методами, твердофазная ^{13}C -ЯМР позволяет получить всестороннюю количественную и структурную информацию ГК и, возможно, является одним из самых мощных методов для всесторонней характеристики сложных органических веществ [18, 19]. В настоящее время ЯМР-спектроскопия является наиболее эффективным аналитическим методом для получения информации о химическом составе и структуре ПОВ, что позволит расширить наши представления о молекулярной структуре ГК [20].

Дельта р. Селенги представляет уникальное природное образование, не имеющее аналогов в своем морфологическом ряду. Ее отличием от других дельт является сейсмическая активность территории, пресноводный характер вод, континентальность климата. Значимость результатов исследований предопределяется тем, что оз. Байкал имеет статус объекта мирового природного наследия ЮНЕСКО, а дельта р. Селенги рассматривается как естественный природный фильтр. Уникальность природной среды дельты – аккумулятивная направленность почвообразовательных процессов, высокая биопродуктивность и разнообразие должны были привести к образованию органического вещества, отличного от такового почв фоновых территорий.

В настоящее время исследованию особенностей пойменных почв дельты р. Селенги посвящено небольшое число работ, однако большинство этих исследований сводится к рассмотрению географических закономерностей формирования почв, биохимическим особенностям и микробиологическим исследованиям. Несмотря на относительную изученность основных типов почв дельты р. Селенги исследование качественного состава ГК, от природы которых зависит устойчивое функционирование почвы в целом, не проводили. Традиционные методы исследования (анализ группового и фракционного состава гумуса и др.) в значительной

степени исчерпали свои возможности, а ряд структурных методов исследования, широко используемых в биохимии, оказались либо трудно применимыми, либо слишком косвенными и сложными в интерпретировании, что ограничивает их широкое использование. Для дальнейшего развития биохимии ГК необходимо выйти на новый уровень методического обеспечения, связанный с использованием современных прямых методов изучения молекулярной структуры и функциональных свойств ГК [21–25].

В связи с этим цель работы – изучение высокомолекулярных органических соединений, таких как ГК, выделенных из пойменных почв Селенгинского дельтового района, с использованием ^{13}C -ядерного магнитного резонанса. Изучение структуры ГК по ЯМР-спектрам наряду с результатами элементного анализа необходимо для оценки экологического состояния и прогнозирования устойчивости ПОВ почв данного района в условиях усиливающегося антропогенного воздействия.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в дельте р. Селенга (самой крупной в мире пресноводной дельты), расположенной в центральной зоне юго-восточного побережья оз. Байкал. Она представляет собой предгорную тектоническую впадину площадью 1120 км², заполненную аллювиальными и делювиальными отложениями. Ее территория находится в пределах Кабанского р-на Республики Бурятия и характеризуется значительным разнообразием экологических условий, обусловленных сложностью геоморфологического строения и разной степенью гидроморфности.

Климат района – резко континентальный, несколько смягченный влиянием оз. Байкал. Годовая сумма осадков равна 400 мм, основная их часть выпадает во 2-й половине лета. Среднегодовая температура – -1°C , средняя температура января – -25°C , июля – 21°C . Коэффициент континентальности в межгорных впадинах Забайкалья достигает 85–90, а на побережье Байкала снижается до 67–73 [26]. Относительная мягкость климата благоприятно сказывается на продуктивности фитоценозов и процессах гумусообразования. Грунтовые воды в дельте залегают на глубинах 0.5–3.0 м в поймах и до 8–15 м – на надпойменных террасах. Дренажность территории дельты Селенги и промывка подтопленных зон байкальскими водами ограничивает возможность засоления почв. Тем не менее, благодаря засушливому весенне-раннелетнему периоду встречается аккумуляция веществ на испарительном барьере [27].

Выделяют 3 высотных уровня в дельте: первый – это внешняя периферическая часть с отметками 455.5–457.5 м н.у.м. с притеррасными понижениями. Высокие острова дельты и центральная пойма с отметками 457.5–460.0 м составляют 2-й и 3-й уровень – высокая пойма с 460.0–464.0 м [27]. Благодаря разновысотности они отличаются по гидрологическому режиму. Каждому уровню характерен своеобразный рельеф, который обуславливает неоднородности почвенного покрова. На высоких островах преобладает грунтовое увлажнение, в центральной пойме в засушливые периоды почвы отрываются от грунтовых вод, а почвы высокой поймы развиваются преимущественно под влиянием атмосферного увлажнения.

Водные вытяжки из почв для определения сухого остатка готовили в соотношении 1: 5. Содержание хлорид-иона измеряли меркурометрическим методом, сульфат-иона – турбидиметрическим, ионов натрия и калия – методом пламенной фотометрии, кальция и магния – методом атомной абсорбции, сухой остаток – методом выпаривания и просушивания в сушильном шкафу при температуре 105°C. Физико-химические свойства определяли общепринятыми методами.

Выделение препаратов ГК из почвенных образцов (слой 0–20 см) и их очистку проводили стандартными методами [28] экстракцией 0.1 н. раствором гидроксида натрия после предварительного декальцирования. 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.

Элементный анализ выделенных препаратов ГК был проведен на автоматическом элементном анализаторе “CHNS/O-2400 series II” PerkinElmer (США). Спектры ядерно-магнитного резонанса ^{13}C -ЯМР были сняты на спектрометре “Avance 300 MHz” Вгюкег (Германия) с рабочей частотой 100.53 МГц с использованием твердофазной методики CP-MAS. 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. Для стандартизации количественных характеристик макромолекул ГК использованы следующие параметры: отношение углерода ароматических структур к углероду алифатических цепей (AR/AL), процентный показатель ароматичности f_a ($\text{Ar}/(\text{Ar} + \text{AL})$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Морфологическая характеристика и классификационное положение почв. В качестве объектов исследований были выбраны гумусово-аккумулятивные горизонты почв с разной степенью гидроморфности: аллювиальные лугово-болотные, аллювиальные луговые и аллювиальные луговые солончаковатые почвы дельты Селенги, по классификации WRB – Fluvisols [29].

В Центральной пойме под злаково-разнотравно-осоковым сообществом формируются аллювиальные луговые почвы ($C_{\text{орг}} = 4.04\%$, pH 7.5) (Mollic Fluvisols). В настоящее время эти почвы не затопляются паводковыми водами, а увлажняются атмосферными осадками. Изученная почва расположена в 1 км от ст. Тимлюй Кабанского р-на на слабо наклонной равнине (52°00' N, 106°32' E). Почва имеет профиль AU–C(ca)~~, среднесуглинистая, мелкозернистой структуры.

В понижениях и по террасам рек на участках с близким залеганием грунтовых вод под осоково-разнотравными сообществами формируются аллювиальные лугово-болотные почвы ($C_{\text{орг}} = 2.43\%$, pH 6.8) (Gleyic Fluvisols). Они формируются в условиях длительного поверхностного и грунтового увлажнения с практически постоянной капиллярной каймой на их поверхности и периодическим затоплением. Профиль их состоит (AU–AU(g)–C(G)~~ из задернованного аккумулятивного горизонта и с выраженным оглеением минеральных горизонтов. Разрез заложен около с. Закалтус (52°01' N, 106°35' E), среднесуглинистого гранулометрического состава, комковатой структуры.

На высокой пойме под злаково-разнотравно-овощным сообществом формируются аллювиальные луговые солончаковатые почвы ($C_{\text{орг}} = 2.49\%$, pH 8.3, сухой остаток – 0.43–0.67%) (Mollic Fluvisols (Salic)) с профилем: AU(s)–C(ca)~~. Данные почвы расположены в 2 км от с. Кабанск (52°03' N, 106°37' E) и характеризуются среднесуглинистым гранулометрическим составом, гумусово-аккумулятивный горизонт черного цвета имеет комковатую структуру, нижний (серого цвета) – пластинчатую.

Горный характер рельефа бассейна Селенги определяет низкое содержание илистой фракции, а аллювиальность – высокую степень сортированности с преобладанием мелкого песка и крупной пыли. Эти качества обуславливают усиление испарительного эффекта в условиях грунтового питания, неустойчивость агрегатов, быстрый отрыв почв от грунтовых вод и переход почв в посталлювиальную стадию.

Повышенное содержание плотного остатка (0.67%) в водной вытяжке исследованных почв

обнаруживает наличие испарительного барьера, в результате чего реакция среды становится щелочной сначала в верхних горизонтах профиля, затем по всему профилю и на отдельных участках приводит к накоплению водорастворимых солей в поверхностном горизонте в количестве, позволяющим отнести их к солончаковым. Ионный состав водной вытяжки свидетельствует о сульфатно-натриевом типе засоления, что обусловлено высоко минерализованными почвенно-грунтовыми водами.

Своеобразие дельты Селенги, связанное с ультрапресностью вод оз. Байкал, заключается в преобладании почв с реакцией среды близкой к нейтральной и слабощелочной. Отмеченная тенденция к засолению является отличительной чертой дельтовых почв и не характерна для поймы Селенги [30]. Засоленные, щелочные и оторфованные кислые почвы в отличие от дельт рек, впадающих в северные и южные моря, широкого распространения в современной дельте не имеют.

Элементный состав гуминовых кислот. Элементный состав ГК, представленный в атомных процентах, характеризуется пониженным содержанием углерода и несколько повышенным водорода и кислорода по сравнению с почвами других территорий [31, 32] (табл. 1).

Закономерное возрастание содержания углерода и снижение количества водорода в исследованных ГВ при переходе от засоленных к гидрометаморфизованным почвам объясняется нарастанием степени конденсированности, что соответствует экологическим условиям почвообразования и степени гидроморфности. Показатель Н/С является климатогенно обусловленным, имеющим свои пределы при разном сочетании теплообеспеченности и увлажненности, его количественные данные специфичны для почв Западной Сибири, Горного Алтая, Урала и Поволжья [33]. Относительное отношение Н/С уменьшается от аллювиальной темногумусовой гидрометаморфизованной к засоленной, что служит доказательством медленного

увеличения обуглероженности ГК и снижения степени их гидрогенизированности.

Отношение С/Н, свидетельствующее об обогащенности ПОВ азотом, в изученных препаратах ГК сужается в луговой солончаковой почве, что является результатом особых условий гумусообразования, связанных с засолением. В них снижается уровень потенциального плодородия, доступность макро- и микроэлементов для растений, ухудшаются водно- физические свойства почв, усиливается минерализация органического вещества. ГК из гумусово-аккумулятивного горизонта данных почв обогащены не только азотом, здесь же и самая высокая доля водорода, что свидетельствует об относительной незрелости этих кислот и значительном участии периферических фрагментов в их структуре.

ГК из аллювиальных лугово-болотных почв менее обогащены азотом, чем ГК аллювиальных луговых почв, при этом они более гидрогенизированы и несколько более окислены, что на фоне уменьшения содержания углерода свидетельствует о большей развитости периферической части молекул. Между тем нельзя делать вывод о развитии именно алифатических компонентов, по данным элементного состава, можно предполагать доминирование углеводов, алкильных и полисахаридных фрагментов. Повышенная степень окисленности ГК также свидетельствует о развитии периферических, в основном карбоксильных групп. В целом установленные уровни содержания углерода и азота в составе ГК исследованных почв близки к средним показателям ГК почв различных природных зон, вычисленным для выборок большого объема [13, 34].

Структурный состав ГК. Для анализа связи между элементным составом и структурными особенностями ГК проанализированы спектры ¹³С-ЯМР препаратов ГК исследованных почв, идентифицированы следующие области: алифатическая (0–95 ppm), ароматическая (95–165 ppm), области карбоксиллов, эфиров и амидов (эти

Таблица 1. Элементный состав гуминовых кислот и степень их окисленности в аллювиальных почвах дельты р. Селенги

Почва	Атомные %				Атомные отношения			ω*
	С	Н	N	О	Н/С	О/С	С/Н	
Аллювиальная луговая	43.8 ± 0.7	32.3 ± 0.3	2.4 ± 0.2	21.1 ± 0.3	0.7	0.4	17.9	0.2
Аллювиальная лугово-болотная	41.1 ± 0.1	33.9 ± 0.1	2.2 ± 0.1	22.6 ± 0.3	0.8	0.5	18.7	0.3
Аллювиальная солончаковая	37.4 ± 0.5	35.0 ± 0.4	2.6 ± 0.1	25.0 ± 0.4	0.9	0.7	14.4	0.4

* Степень окисленности.

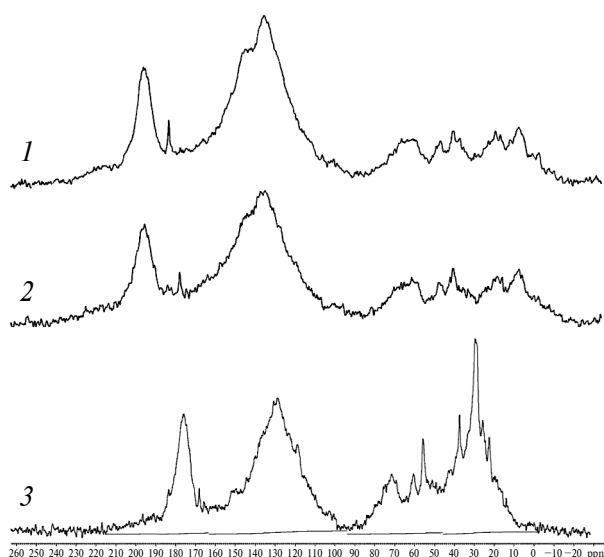


Рис. 1. Спектры ^{13}C -ЯМР гуминовых кислот: 1 – аллювиальная луговая, 2 – аллювиальная лугово-болотная, 3 – аллювиальная луговая солончаковатая почва.

функциональные группы могут быть связаны как с алифатической, так и с ароматической компонентой ГК (165–185 ppm) и карбониллов (185–200 ppm), что свидетельствует о большой сложности строения ГК и полифункциональных свойствах, обуславливающих их активное участие в почвенных процессах (рис. 1).

Оценка относительного содержания атомов углерода основных функциональных групп и структурных фрагментов в препаратах ГК аллювиальных почв проведена интегрированием линий поглощения в соответствующих диапазонах химических сдвигов (табл. 2).

В алифатической области во всех спектрах ГК присутствуют CH_2 -алкильные фрагменты, сосредоточенные в области 30–50 ppm, характеризующиеся наибольшей устойчивостью

к трансформации среди алифатических компонентов. Считается, что высокая доля атомов алифатических фрагментов связана с накоплением продуктов растительного происхождения – воскоsmол, гликолипидов, кутина, жирных кислот [35]. В ГК луговых солончаковатых почв он наиболее выражен, скорее всего из-за объема и состава органических остатков, так и специфическими биохимическими условиями их разложения.

Во всех спектрах ГК видны отчетливые пики, которые можно наблюдать в диапазоне 45–65 ppm, предполагается что данный диапазон связан с метоксильными группами, обусловленными присутствием лигниновых фрагментов, а также α - и β -углеродными атомами аминокислотных фрагментов [36]. Сильные сигналы в области 65–95 ppm относятся к алифатическим фрагментам, дважды замещенным гетероатомам (в том числе углеводными) и метиловому углероду простых и сложных эфиров [37].

В области ароматических фрагментов наиболее широкие пики приходятся на C-, H-замещенные ароматические фрагменты (110–130 ppm), что характерно в большей степени для почв под луговой растительностью. Пик при 147–149 ppm (область резонирования связей ароматической природы) обусловлен соединениями лигнинового происхождения [38], такие пики скорее всего обусловлены высоким содержанием целлюлозолигнинового комплекса в растительности Забайкалья [39]. ЯМР-спектры ГК аллювиальной луговой почвы имели более интенсивные сигналы в этой области по сравнению с луговой солончаковатой почвой.

В области 172–174 ppm присутствует сигнал, относимый к углероду карбоксильных групп, но также он может принадлежать и карбонил группе амидов и полипептидов [40]. Преобладание карбоксильных групп служит основанием для причисления гуминовых веществ к кислотам, в частности, к высокомолекулярным ароматическим оксикарбоновым кислотам. Атомы углерода хинонных фрагментов и карбонильных групп альдегидов

Таблица 2. Содержание структурных фрагментов гуминовых кислот аллювиальных почв дельты р. Селенги по данным ^{13}C -ЯМР, %

Почва	Химический сдвиг, ppm						AR/AL	fa, %
	0–45	45–65	65–95	95–165	165–185	185–200		
Аллювиальная луговая	12.3	6.5	8.5	55.1	15.5	2.1	2.0	66,9
Аллювиальная лугово-болотная	12.6	8.4	8.1	53.7	17.2		1.8	64.8
Аллювиальная луговая солончаковатая	28.5	16.9		39.3	13.3	2.0	0.9	41.3

Примечание. AR/AL – сигналы от ^{13}C ароматических структур (AR) суммированы по областям 165–95 ppm, алифатических структур (AL) – 95–0 ppm; fa – степень ароматичности.

и кетонов вносят свой вклад в слабые сигналы в области 185–200 ppm, и незначительное их содержание, вероятно, связано с невысокой скоростью разложения органического вещества в этих почвах в результате неблагоприятных водно-физических условий (переувлажнение), которые снижают активность почвенных микроорганизмов. Засоление также отрицательно влияет на многие почвенные организмы, ограничивая доступность воды в результате низкого осмотического потенциала в почве и ионной токсичности [41].

Полученные данные о составе ГК позволяют заключить, что изменения элементного состава сопровождаются изменениями состава и структурных особенностей гуминовых кислот. В целом ГК аллювиальной луговой почвы более обогащены ароматическими фрагментами, чем ГК лугово-болотных и луговых солончаковатых почв. Они представляют собой более “зрелый” продукт гумификации. Для сравнения степени ароматичности (fa) структурных фрагментов ГК аллювиальных почв было использовано соотношение углерода ароматических структур к углероду алифатических цепей AR (165–95 ppm)/AL (95–0 ppm), которое отражает гидрофобно-гидрофильный баланс в ГК. Данное соотношение увеличилось более чем в 2 раза при переходе от аллювиальной луговой солончаковой к аллювиальной луговой. Меньшая степень ароматичности препарата ГК луговой солончаковатой почвы также подтверждает величины Н/С, полученные по данным элементного состава, и указывает на большее содержание в них менее разложенных гидрофильных структур (в первую очередь – целлюлозных остатков).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, формирование в поймах р. Селенги аллювиальных почв с разным содержанием С, Н, О, N и с различными функциональными группами в гуминовых кислотах обусловлено биоклиматическими условиями, связанными с длительным нахождением их в мерзлотном состоянии, режимом грунтовых вод, составом отложений, ботанического состава растений. Несколько большая степень ароматичности в аллювиальной луговой и лугово-болотной почве связана с экологическими условиями и химическим составом предшественников гумификации. Возрастание доли алифатических структур и снижение доли ароматических фрагментов в составе препаратов гуминовых кислот (ГК) луговой солончаковой почвы позволяют говорить об упрощении строения гуминовой кислоты. Грунтовое увлажнение в совокупности с засолением заметно снижает скорость трансформации почвенного органического вещества (ПОВ) и приводит к увеличению доли неокисленных

алифатических фрагментов. Значительная доля реакционно-способных функциональных групп в составе ГК придает почвам высокую адсорбционную способность и является определяющим фактором при рассмотрении их в качестве биогеохимических природных барьеров в дельте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Martin M.V., Gebuhr C., Daniel O., Wiltshire K.H.* Characterization of a humic acid extracted from marine sediment and its influence on the growth of marine diatoms // *J. Marine Biol. Associat. UK*. 2014. V. 94(5). P. 895–906. <https://doi.org/10.1017/S0025315414000368>
2. *Fernandes A.N., Giovanela M., Esteves V.I.* Elemental and spectral properties of peat and soil samples and their respective humic substances // *J. Mol. Str.* 2010. V. 971. P. 33–38. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2010.02.069>
3. *Nebbioso A., Piccolo A.* Molecular characterization of dissolved organic matter (DOM): a critical review // *Anal. Bioanal. Chem.* 2013. V. 405. P. 109–124. <https://doi.org/10.1007/s00216-012-6363-2>
4. *Schaeffer A., Nannipieri P., Kästner M.* From humic substances to soil organic matter—microbial contributions. In honour of Konrad Haider and James P. Martin for their outstanding research contribution to soil science // *J. Soil. Sediment.* 2015. V. 15. P. 1865–1881. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1177-4>
5. *Hayes M.H.B., Swift R.S.* An appreciation of the contribution of Frank Stevenson to the advancement of studies of soil organic matter and humic substances // *J. Soil. Sediment.* 2018. V. 18. P. 1212–1231. <https://doi.org/10.1007/s11368-016-1636-6>
6. *Kleber M., Lehmann J.* Humic substances extracted by alkali are invalid proxies for the dynamics and functions of organic matter in terrestrial and aquatic ecosystems // *J. Environ. Qual.* 2019. VI. 48. P. 207–216. <https://doi.org/10.2134/jeq2019.01.0036>
7. *Dou S., Shan J., Song X., Cao R., Wu M., Li C., Guan S.* Are humic substances soil microbial residues or unique synthesized compounds? A perspective on their distinctiveness // *Pedosphere.* 2020. V. 30(2). P. 159–167. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(20\)60001-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60001-7)
8. *Nobili M., Bravo C., Chen Y.* The spontaneous secondary synthesis of soil organic matter components: a critical examination of the soil continuum model theory // *Appl. Soil Ecol.* 2020. V. 154. P. 103655. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103655>
9. *Simpson A.J., Kingery W.L., Hayes M.H., Spraul M., Humpfer E., Dvortsak P., Kerssebaum R., Godejohann M., Hofmann M.* Molecular structures and asso-

- ciations of humic substances in the terrestrial environment // *Naturwissenschaften*. 2002. V. 89. PP. 84–88. <https://doi.org/10.1007/s00114-001-0293-8>
10. *Lehmann J., Kleber M.* The contentious nature of soil organic matter // *Nature*. 2015. V. 528. P. 60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
 11. *Hatcher P.G., Dria K.J., Kim S., Frazier S.W.* Modern analytical studies of humic substances // *Soil Sci*. 2001. V. 166. P. 770–794. <https://doi.org/10.1097/00010694-200111000-00005>
 12. *Leenheer J.A.* Systematic approaches to comprehensive analyses of natural organic matter // *Ann. Environ. Sci.* 2009. V. 3. P. 1–130.
 13. *Stevenson F.J.* Humus chemistry: genesis, composition, reactions. N.Y.: John Wiley and Sons, 1994. 512 p.
 14. *Claridge T.D.W.* High-resolution NMR techniques in organic chemistry. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2016. 541 p.
 15. *Hedges J.I., Eglinton G., Hatcher P.G., Kirchman D.L., Arnosti C., Derenne S., Evershed R.P., Kögel-Knabner I., De Leeuw J.W., Littke R., Michaelis W., Rullkotter J.* The molecularly-uncharacterized component of nonliving organic matter in natural environments // *Org. Geochem.* 2000. V. 31. P. 945–958. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(00\)00096-6](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(00)00096-6)
 16. *Калабин Г.А., Каницкая Л.В., Кушнарев Д.Ф.* Количественная спектроскопия ЯМР природного органического сырья и продуктов его переработки. М.: Химия, 2000. 408 с.
 17. *Чуков С.Н.* Структурно-функциональные параметры органического вещества почв в условиях антропогенного воздействия. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2001. 216 с.
 18. *Maо J., Cao X., Olk D.C., Chu W., Schmidt-Rohr K.* Advanced solid-state NMR spectroscopy of natural organic matter // *Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy*. 2017. V. 100. P. 17–51. <https://doi.org/10.1016/j.pnmrs.2016.11.003>
 19. *Чуков С.Н., Лодыгин Е.Д., Абакумов Е.В.* Использование ¹³C-ЯМР-спектроскопии в исследовании органического вещества почв (обзор) // *Почвоведение*. 2018. № 8. С. 952–964.
 20. *Kogel-Knabner I., Rumpel C.* Advances in molecular approaches for understanding soil organic matter composition, origin, and turnover: A Historical overview // *Adv. Agron.* 2018. V. 149. P. 1–48. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2018.01.003>
 21. *Polyakov V., Abakumov E., Lodygin E., Vasilevich R., Lapidus A.* Distribution of molecular weight of humic substances isolated from soils of tallgrass temperate rainforests (Chernevaya Taiga) // *Agronomy*. № 12(8). 1760. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081760>
 22. *Abakumov E.V., Polyakov V.I., Chukov S.N.* Approaches and methods for studying soil organic matter in the carbon polygons of Russia (Review) // *Euras. Soil Sci.* 2022. V. 55(7). P. 849–860. <https://doi.org/10.1134/S106422932207002X>
 23. *Lodygin E., Abakumov E.* The Impact of agricultural use of retisols on the molecular structure of humic substances // *Agronomy*. 2022. № 12(1). 144. <https://doi.org/10.3390/agronomy12010144>
 24. *Polyakov V., Loiko S., Istigechev G., Lapidus A., Abakumov E.* Elemental and molecular composition of humic acids isolated from soils of tallgrass temperate rainforests (Chernevaya taiga) by ¹H-¹³C HECTCOR NMR spectroscopy // *Agronomy*. 2021. № 11(10). 1998. <https://doi.org/10.3390/agronomy11101998>
 25. *Polyakov V.I., Chegodaeva N.A., Abakumov E.V.* Molecular and elemental composition of humic acids isolated from selected soils of the Russian Arctic // *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Biologiya*. 2019. № 47. P. 6–21. <https://doi.org/10.17223/19988591/47/1>
 26. *Жуков В.М.* Климат Бурятской АССР. Улан-Удэ: Бурят. кн. изд-во, 1960. 188 с.
 27. *Гынинова А.Б., Шоба С.А., Балсанова Л.Д., Гынинова Б.Д.* Почвы дельты реки Селенги (генезис, география, геохимия). Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2012. 344 с.
 28. *Орлов Д.С., Гришина Л.А.* Практикум по химии гумуса. М.: Изд-во МГУ, 1981. 273 с.
 29. IUSS working group WRB world reference base for soil resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World soil resources Reports No. 106. Rome: FAO, 2015. 192 p.
 30. *Убугунова В.И., Убугунов Л.Л., Корсунов В.М., Балабко П.Н.* Аллювиальные почвы речных долин бассейна р. Селенги. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 1998. 290 с.
 31. *Орлов Д.С.* Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во МГУ, 1990. 324 с.
 32. *Кленов Б.М.* Устойчивость гумуса автоморфных почв Западной Сибири. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 173 с.
 33. *Дергачева М.И., Некрасова О.А., Оконешникова М.В., Васильева Д.И., Гаврилов Д.А., Очур К.О., Ондар Е.Э.* Соотношение элементов в гуминовых кислотах как источник информации о природной среде формирования почв // *Сибир. экол. журн.* 2012. № 5. С. 643–647.
 34. *Орлов Д.С., Бирюкова О.Н., Суханова Н.И.* Органическое вещество почв Российской Федерации. М.: Наука, 1996. 256 с.
 35. *Winkler A., Haumaier L., Zech W.* Insoluble alkyl carbon components in soils derive mainly from cutin and suberin // *Org. Geochem.* 2005. V. 36(4). P. 519–529. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2004.11.006>

36. 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(8). P. 935–939. <https://doi.org/10.1016/j.org-geochem.2008.03.021>
37. Simpson A.J., Simpson M.J. Nuclear magnetic resonance analysis of natural organic matter. Biophysical-chemical processes in involving natural nonliving organic matter in environmental systems / Eds. N. Senesi, B. Xing, P.M. Huang. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2009. P. 589–650.
38. Ковалева Н.О., Ковалев И.В. Лигниновые фенолы в почвах как биомаркеры палеорастительности // *Почвоведение.* 2015. № 9. С. 1073–1086. [https://doi.org/10.7868/S0032180X15\(\(090063](https://doi.org/10.7868/S0032180X15((090063)
39. Чимитдоржиева Г.Д. Особенности органического вещества криогенных почв // *Почвоведение.* 1991. № 11. С. 125.
40. Лодыгин Е.Д., Безносиков В.А., Василевич Р.С. Молекулярный состав гумусовых веществ тундровых почв (¹³C-ЯМР-спектроскопия) // *Почвоведение.* 2014. № 5. С. 546–552. <https://doi.org/10.7868/S0032180X14010079>
41. Ибраева М.А., Шаухарова Д.Е., Джуманова М. Влияние засоления почв на микробиологическую активность // *Почвовед./ и агрохим.* 2020. № 2. С. 71–78.

Elemental Composition and Structural Features of Humic Acids from Floodplain Soils of the Selenga River Delta

E. Y. Milkheev^{a, #}, N. D. Baldanov^b

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

^b*Filippov Buryatia State Academy,
ul. Pushkina 8, Ulan-Ude 670047, Russia*

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

The study of the elemental composition and structure of humic acids of floodplain soils of the delta of the Selenga River (Western Transbaikalia) was carried out. The research area belongs to the delta meadow-marsh and forest-steppe region, which is an area where deposits of sandy and silty fractions are actively carried out from the entire basin. Here, soils and vegetation are natural biofilters. Depending on the bioclimatic conditions, groundwater regimes, and sediment composition, soils are formed that differ in the composition of humus and humic acids (HA). The objects of research were alluvial (meadow, meadow-marsh, meadow saline) soils of the Selenga delta, according to the classification WRB – Fluvisols. The analysis of ¹³C-NMR spectra of HA preparations of the studied floodplain soils made it possible to identify ranges of chemical shifts belonging to carbon atoms of various functional groups and molecular fragments. NMR spectroscopy data showed that humic acids of alluvial meadow soil are more enriched in aromatic fragments than humic acids of meadow-marsh and meadow saline soils. A slightly higher degree of aromaticity in alluvial meadow and meadow-marsh soil is associated with environmental conditions and the component composition of the precursors of humification. An increase in the proportion of aliphatic structures and a decrease in the proportion of aromatic fragments in the composition of preparations of meadow salt marsh soil make it possible to judge the simplification of the structure of humic acid. Soil moisture in combination with salinization significantly reduces the rate of transformation of soil organic matter and leads to an increase in the proportion of non-oxidized aliphatic fragments. The use of NMR spectroscopy in the study of soils has significantly expanded the understanding of its composition and structure, deepened the understanding of the mechanisms of humification and transformation of soils of various genesis.

Keywords: Fluvisols, alluvial soils, Selenga River delta, humic acids.

УДК 631.811.9:546.47:633.11"321":631.559:632.631.432

ВЛИЯНИЕ СЕЛЕНА НА УРОЖАЙ И АМИНОКИСЛОТНЫЙ СОСТАВ ЗЕРНА ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ В ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ПРИ ЗАСУХЕ[§]

© 2024 г. И. И. Серегина*

Российский Государственный Аграрный Университет—МСХА им. К.А. Тимирязева
127550 Москва, ул. Тимирязевская, 49, Россия

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

В модельных опытах в почвенной культуре изучали влияние различных способов внесения селенита натрия на формирование урожайности и аминокислотного состава зерна сортов яровой пшеницы Злата и Эстер в зависимости от условий водообеспечения. Селенит натрия вносили путем предпосевной обработки семян и листовой обработки вегетирующих растений. В исследовании моделировали оптимальные условия водообеспечения и дефицит влаги в почве в критический период роста растений. Изучали роль селена в регулировании продукционного процесса и формировании аминокислотного состава зерна яровой пшеницы. Было установлено, что продукционный процесс растений пшеницы как при оптимальном водообеспечении, так и в условиях засухи, зависел от способа применения селена и сортовых особенностей яровой пшеницы. Результаты позволили сделать предположение, что селен активизировал аттрагирующую способность колоса за счет усиления его акцепторных свойств. В данных условиях зерновки были лучше обеспечены ассимилятами, что и позволило сформировать максимально возможный урожай зерна пшеницы. В условиях засухи при листовой обработке растений селенитом натрия были созданы благоприятные условия формирования репродуктивных органов пшеницы, что стимулировало восстановление процессов оттока ассимилятов из вегетативной массы в формирующуюся зерновку. Это позволило влиять на продукционные процессы и снижать депрессию формирования урожая пшеницы. При применении селена выявлено увеличение совокупного содержания ключевых аминокислот, которые оказывали существенное влияние на антиоксидантный статус растений и способствовали реализации их адаптивного потенциала. Выявлено положительное влияние селена на содержание ряда аминокислот, в том числе на ассимиляцию метионина, что вероятно, было обусловлено синтезом селенометионина, поскольку пути их образования похожи и разделить их не представляется возможным. Наибольшее влияние селена отмечено при выращивании пшеницы сорта Злата по сравнению с пшеницей сорта Эстер, что определено сортовыми различиями, заложенными генетически и различным содержанием белка в зерне.

Ключевые слова: сорта яровой пшеницы, селен, урожай зерна, аминокислотный состав зерна, условия водообеспечения.

DOI: 10.31857/S0002188124040102, **EDN:** dlhasw

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия одной из основных причин климатических изменений считается нарастание антропогенной нагрузки на окружающую среду обитания, что приводит к нарушению ее естественного функционирования [1]. Сельскохозяйственное производство в наибольшей степени подвергается негативному влиянию изменений окружающей среды, в результате чего происходят

значительные потери урожая культур и снижение экономической эффективности применяемых технологий [2, 3]. Наибольшее негативное действие на окружающую среду оказывают дефицит влаги в почве и высокие температуры воздуха, вызывающие атмосферную и почвенную засухи, которые характерны для большой территории страны, случаясь не реже одного раза в 3–4 года [4]. Засуха в критический период роста растений запускает механизмы, вызывающие окислительные процессы в клетках и тканях растений, которые приводят к торможению ростовых и генеративных процессов, в результате чего происходит повреждение формирующейся пыльцы. Следствием этого

[§] Работа выполнена за счет средств программы развития университета в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030».

является потеря фертильности пыльцевых зерен, что является завершающим процессом микроспорогенеза оплодотворения и вызывает снижение количества формирующихся семян в генеративных органах. Это является главной причиной потери урожайности культур [5, 6]. В связи с этим одним из актуальных вопросов является поиск технологий, позволяющих снижать ущерб при ведении сельскохозяйственного производства в экстремальных условиях выращивания.

Современные агротехнологии позволяют решать вопросы управления продукционным процессом путем регулирования условий минерального питания не только за счет макроэлементов, но также при включении в технологию выращивания культур и микроэлементов. В этом отношении селен является одним из элементов, рациональное применение которого позволяет стабилизировать антиоксидантную систему растений и снизить негативное действие факторов окружающей среды, вызывающих стрессовые реакции, положительно воздействуя на стресс-толерантность растений [7–10]. Исследования последних десятилетий показали, что селен при выращивании растений обладает защитным эффектом, который может быть достигнут благодаря стимулированию формирования селенобелков, в частности, защитных селенопероксидаз [11], в том числе он принимает участие в построении глутатионпероксидазы – фермента антиоксидантной защиты растительного организма от действия свободных радикалов, которые образуются в результате окислительного стресса, участвуя таким образом в поддержании в клетке перекисного гомеостаза [12–15].

Селен способен увеличивать поступление азота из удобрений и почвы и улучшать фотосинтетическую активность растений, что способствует увеличению содержания аминокислот, синтез которых зависит от количества глюкозы, образующейся в процессе фотосинтеза, содержания азота в растениях, поглощаемого из почвы и в результате дыхательной активности [16–20].

Физиолого-биохимическая роль селена в растениях обусловлена сходным строением его атома с атомом серы, аналогичным строением внешних их электронных оболочек, что обусловлено нахождением в одной подгруппе с кислородом в периодической системе Д.И. Менделеева [21, 22]. В то же время специфические свойства селена по сравнению с серой связаны с появлением у него новых электронных групп, что определяет увеличение заряда атома, атомной массы, ионных и ковалентных радиусов и уменьшение энергии, необходимой на отрыв внешних электронов. В связи с этим снижаются потенциалы ионизации и электроотрицательность [21], что определяет большие

восстановительные свойства селена по сравнению с серой. Благодаря близким свойствам селена и серы, элемент способен встраиваться вместо серы в различные неорганические соединения, а также в ряд органических веществ, в том числе в аминокислоты с образованием специфических аминокислот [23, 24].

При достаточном содержании селена в почве растения способны синтезировать ряд селенсодержащих аминокислот, в том числе селеноцистеин, селенометионин, и др., которые могут включаться в специфические белки без существенного снижения их активности [20, 22, 24, 25]. Было показано, что данные аминокислоты способствуют формированию антиоксидантного статуса и активизируют механизмы защиты клетки растений от действия свободно-радикальных форм кислорода, являющихся одними из основных форм метаболитов при окислительных стрессах [20, 26]. Исследования показали, что селенометионин обладает свойством быстро окисляться, что создает условия для быстрой нейтрализации реакционных форм кислорода в клетках растений [20, 27]. Это служит указанием на влияние селенсодержащих соединений на процессы биосинтеза аминокислот и белков в растениях. Установлено, что основной из обнаруженных до настоящего времени функций селена в растениях является его антиоксидантная роль. В некоторых работах отмечено снижение отрицательного действия окислительного стресса, вызванного засухой, и активизация ростовых процессов в период репарации [16–20].

Следует отметить, что вопросы влияния селенсодержащих соединений на содержание аминокислот в зерне яровых зерновых изучены слабо. В связи с этим цель работы – изучение влияния селенита натрия на формирование урожая и содержание аминокислот в зерне яровой пшеницы в зависимости от условий водообеспечения растений.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленных вопросов был проведен вегетационный опыт в вегетационном домике кафедры агрономической, биологической химии и радиологии РГАУ–МСХА им. К.А. Тимирязева. Закладку и проведение опыта проводили по общепринятым методикам [28].

Объектом исследования была яровая пшеница (*Triticum aestivum* L.) сортов Злата и Эстер. Растения яровой пшеницы выращивали в сосудах Митчеллиха вместимостью 6 кг сухой почвы. Почва – урбано-зем типичный среднесуглинистый со следующими агрохимическими показателями: содержание гумуса (по Тюрину) – 1.5%, рН_{KCl} 5.7 (ГОСТ 26483-25), Н_T (по Каппену) – 1.2 мг-экв/100 г почвы

(ГОСТ 26212-91), S (по Каппену–Гильковицу) – 24.3 мг-экв/100 г почвы (ГОСТ 27821-88), V – 95.3%, N_{щелочегидр} – 82 мг/кг почвы (ГОСТ 26107-84). Обеспеченность почвы подвижными формами фосфора и калия (по Кирсанову) составляла 180 (V класс) и 145 (IV класс) мг/кг почвы (ГОСТ 54650–2011) соответственно.

В исследовании использовали 0.01%-ный раствор селенита натрия (Na₂SeO₃) путем предпосевной обработки семян и листовой обработки вегетирующих растений на V этапе органогенеза. В контрольных вариантах селенит натрия не вносили.

Уровень минерального питания создавали путем внесения аммиачной селитры (NH₄NO₃), хлористого калия (KCl) и аммофоса (NH₄H₂PO₄) из расчета N₁₀₀P₁₅₀K₁₅₀.

Создавали 2 уровня водообеспечения: оптимальное (60% ПВ) и дефицит влаги в критический период роста растений путем прекращения полива до наступления VI этапа органогенеза – выхода в трубку.

Посев семян проводили по 30 шт./сосуд с последующим прореживанием до 15 шт. в фазе кущения. Повторность опыта четырехкратная.

После уборки урожая определяли массу зерна (г/сосуд), число зерен и колосков в колосе, массу

1000 зерен, биометрические показатели растений: длину стебля (см), длину колоса (см). Определяли структуру урожая.

Аналитические исследования проводили по общепринятым методикам. Содержание незаменимых аминокислот в белке зерна яровой пшеницы определяли методом ионообменной хроматографии с использованием автоматического анализатора аминокислот ААА Т 339 (Чехия).

Статистическую обработку всех полученных данных проводили по общепринятой методике с помощью однофакторного метода дисперсионного анализа [28].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние селена на урожай сортов яровой пшеницы представлено в табл. 1.

В условиях оптимального водообеспечения применение селенита натрия привело к достоверному росту массы зерна изученных сортов пшеницы. Эффективность действия микроэлемента зависела от способа его использования и сортовой специфики пшеницы, обусловленной генетическими особенностями. При предпосевной обработке семян пшеницы сорта Злата прибавка составила 37, при

Таблица 1. Влияние селена на урожайность и структуру растений яровой пшеницы разных сортов в различных условиях водообеспечения

Вариант	Сорт яровой пшеницы											
	Злата						Эстер					
	масса зерна, г/сосуд	длина, см		число, шт./растение		масса 1000 зерен, г	масса зерна, г/сосуд	длина, см		число, шт./растение		Масса 1000 зерен, г
		колоса	стебля	колосков	зерен			колоса	стебля	колосков	зерен	
Оптимальное водообеспечение												
Без обработки (контроль)	10.5	7.0	86.2	20.4	26.5	26.4	16.2	7.3	79.2	19.2	34.7	31.1
ПОС	14.4	7.1	97.3	20.3	30.1	31.9	21.3	7.4	83.3	19.5	35.7	39.8
ОВР	14.9	7.1	90.5	25.9	38.7	25.6	22.8	8.4	83.3	24.9	40.5	37.5
HCP ₀₅	0.7	0.2	2.7	1.1	1.4	1.4	1.0	0.4	4.1	1.1	1.2	1.8
Засуха												
Без обработки (контроль)	8.1	6.6	84.6	17.0	19.6	27.6	9.9	6.5	73.2	16.1	25.2	26.2
ПОС	9.9	6.8	86.0	17.4	23.8	28.6	10.7	6.9	73.7	17.0	27.2	26.1
ОВР	10.8	6.8	86.8	17.3	23.2	32.3	11.9	7.1	73.6	19.8	29.0	27.2
HCP ₀₅	0.5	0.2	3.3	0.8	1.6	1.5	0.5	0.3	3.6	0.9	1.5	1.3

Примечание. ПОС – предпосевная обработка семян, ОВР – опрыскивание вегетирующих растений (листовая обработка вегетирующих растений). То же в табл. 2.

опрыскивании растений – 42%. Прибавка зерновой продуктивности пшеницы сорта Эстер составила 31 и 41% соответственно. Выявлено, что формирование урожайности растений пшеницы было обусловлено влиянием селена на разные стороны продукционного процесса. Использование предпосевной обработки семян пшеницы сорта Злата определило увеличение озерненности колоса и выполненности зерна. Прибавка количества зерен в колосе пшеницы сорта Злата составила в данном варианте 14, массы 1000 зерен – 21%. У пшеницы сорта Эстер увеличение массы зерна определялось в первую очередь выполненностью зерна, которая возросла на 28%. Число зерен в колосе этого сорта увеличилось только на 3%. Применение листовой обработки вегетирующих растений пшеницы сорта Злата способствовало увеличению озерненности колоса в 1,48 раза, в то время как масса 1000 зерен возросла только на 3%. У пшеницы сорта Эстер применение листовой обработки растений привело к росту количества зерен на 17, массы 1000 зерен – на 21%. Отмечено, что при использовании листовой обработки растений выявлено увеличение количества колосков на 27% у пшеницы сорта Злата и на 30% у пшеницы сорта Эстер. При этом длина колоса увеличилась только у пшеницы сорта Эстер на 15%. Длина растений пшеницы сорта Эстер увеличилась достоверно на 5% при обоих способах применения селена. У растений пшеницы сорта Злата нарастание стебля отмечено при предпосевной обработке семян на 13, при листовой обработке растений – на 5%.

При выращивании пшеницы в условиях краткосрочной почвенной засухи было выявлено снижение урожайности растений пшеницы сорта Злата в 1,30 раза, пшеницы сорта Эстер – в 1,64 раза в контрольном варианте по сравнению с вариантом, где растения выращивали при оптимальном водообеспечении. Депрессия урожайности пшеницы при засухе в критический период роста была обусловлена снижением всех ростовых функций растений, что вызвало уменьшение биометрических показателей и озерненности колоса на 35 и 37% у сортов Злата и Эстер соответственно. При этом масса 1000 зерен уменьшилась на 19% только у сорта Эстер, что и послужило причиной резкого уменьшения зерновой продуктивности по сравнению с пшеницей сорта Злата.

В стрессовых условиях выращивания пшеницы при использовании селена было установлено его положительное действие на формирование урожая и его структуры обоих сортов. Было выявлено увеличение массы зерна у пшеницы сорта Злата на 22% при обработке семян селеном за счет нарастания озерненности колоса на 21 и на 33% при листовой обработке растений в результате увеличения количества зерен в колосе на 18% и массы 1000 зерен

на 17% по сравнению с контрольным вариантом без применения селена. У пшеницы сорта Эстер прибавка зерновой продуктивности составила 8 и 20% в основном за счет нарастания количества зерен в колосе на 7 и 15% соответственно. Применение селенита натрия оказало слабое влияние на биометрические показатели растений пшеницы сорта Злата. У растений сорта Эстер выявлено удлинение стебля на 6% при обработке семян селеном, на 9% – при обработке вегетирующих растений селеном. Также при обработке растений сорта Эстер селеном выявлено удлинение колоса на 23%.

Таким образом, результаты исследования показали положительное действие селенита натрия на формирование продуктивности и биометрические показатели растений пшеницы обоих сортов. Следует отметить, что продукционный процесс растений пшеницы как при оптимальном водообеспечении, так и в условиях засухи, зависел от способа применения селена и сортовых особенностей яровой пшеницы. В оптимальных условиях водообеспечения показано, что при использовании предпосевной обработки селеном семян пшеницы сорта Злата увеличение продуктивности происходило в результате стимулирования процессов формирования количества зерен, что, по-видимому, было обусловлено влиянием на развитие конуса нарастания. Это было установлено в наших предыдущих исследованиях [29]. В то же время при обработке семян селеном также отмечено сохранение количества колосков в колосе при одновременном увеличении выполненности зерновок обоих сортов. Можно сделать предположение, что селен активизировал аттрагирующую способность колоса за счет усиления его акцепторных свойств. Это обуславливало лучшее обеспечение зерновок ассимилятами и позволяло сформировать максимально возможный в данных условиях урожай зерна пшеницы. Данные закономерности также были показаны в опытах с пшеницей и ячменем [30–33].

При использовании листовой обработки селеном выявлено изменение биометрических показателей растений обоих сортов пшеницы. Наблюдали увеличение длины колоса и количества продуктивных колосков, что вызвало увеличение количества зерновок на 27–30% и урожая зерна пшеницы сортов Злата и Эстер в данных условиях выращивания.

Изменение интенсивности продукционного процесса пшеницы под действием окислительного стресса, вызванного засухой в критический период роста, было обусловлено нарушением ростовых и репродуктивных процессов. Вероятно, что повреждение конуса нарастания пшеницы вследствие дефицита влаги в почве определяло ухудшение биометрических показателей колоса пшеницы и нарушение оттока ассимилятов в формирующиеся зерновки, что послужило причиной снижения урожая

пшеницы. Применение селена в данных условиях, вероятно, способствовало сохранению деятельности корневой системы, что позволило растениям пшеницы адаптироваться к стрессовым условиям [11, 13, 34–36]. В результате этого улучшались условия формирования репродуктивных органов пшеницы, что стимулировало восстановление процессов оттока ассимилятов из вегетативной массы в формирующуюся зерновку и обеспечивало увеличение урожая зерна пшеницы. У растений сорта Злата формирование урожая при обработке семян селеном происходило в основном за счет количества зерен (23.8 шт./растение против 19.6 шт. в контроле), при обработке вегетирующих растений – за счет количества зерен (23.3 шт./растение против 19.6 шт./растение в контроле) и их размера, или массы 1000 зерен (32.3 г против 27.6 г в контроле). В тех же условиях,

у растений пшеницы сорта Эстер при применении селена урожай возростал в основном в результате прироста количества продуктивных колосков и зерновок в колосе.

Известно, что селен активизирует процессы поступления и ассимиляции азота из удобрений и почвы [18, 29, 37], что оказывает влияние на синтез аминокислот и накопление белковых соединений, определяя качество зерна зерновых и биологическую ценность основной продукции овощных культур [38].

В связи с этим в задачи нашего исследования входило изучение влияния различных способов применения селенита натрия на аминокислотный состав зерна яровой пшеницы сортов Злата и Эстер при выращивании в оптимальных условиях водообеспечения и при засухе в критический период роста растений. Результаты исследования приведены в табл. 2.

Таблица 2. Содержание аминокислот в белке зерна различных сортов яровой пшеницы в зависимости от условий водообеспечения, мг/100 г сухого вещества

Аминокислоты												
Вариант	лизин	метионин	триптофан	треонин	аргинин	цистин	изолейцин	лейцин	валин	гистидин	фенилаланин	Сумма
Оптимальное водообеспечение												
Яровая пшеница сорта Злата												
Контроль	370	210	160	380	640	290	450	890	560	310	620	4880
ПОС	380	220	170	400	670	310	470	930	590	330	660	5130
ОВР	370	210	160	380	640	290	450	900	560	310	630	4900
Яровая пшеница сорта Эстер												
Контроль	330	180	150	340	570	270	400	780	500	280	540	4340
ПОС	400	230	180	420	720	330	510	1000	630	350	710	5480
ОВР	380	210	160	390	660	300	460	920	580	320	640	5020
Засуха												
Вариант	лизин	метионин	триптофан	треонин	аргинин	цистин	изолейцин	лейцин	валин	гистидин	фенилаланин	Сумма
Яровая пшеница сорта Злата												
Контроль	320	170	140	320	540	250	370	740	470	260	510	4090
ПОС	350	190	160	360	600	280	420	830	530	300	580	4600
ОВР	380	220	170	400	680	310	480	950	590	330	670	5180
Яровая пшеница сорта Эстер												
Контроль	380	210	160	390	660	300	460	920	580	320	650	5030
ПОС	380	220	170	400	670	310	470	940	590	330	660	5140
ОВР	410	240	180	430	730	330	520	1020	640	360	730	5590

Было выявлено, что селен оказывал положительное влияние на содержание аминокислот в белке зерна пшеницы. Эффективность действия селена зависела от способа его применения и условий водообеспечения. Например, обработка семян пшеницы селенитом натрия перед посевом в условиях оптимального водообеспечения способствовала увеличению содержания суммы аминокислот на 5% и всех аминокислот в среднем на 3–6% в белке зерна яровой пшеницы сорта Злата и на 26 и 20–31% соответственно в белке зерна пшеницы сорта Эстер. Применение листовой обработки растений способствовало увеличению содержания аминокислот только у сорта Эстер. Содержание суммы аминокислот увеличилось на 16% и содержание аминокислот возросло в среднем от 7 до 19%. Наибольшее увеличение содержания аминокислот метионина, изолейцина и лейцина (на 28% против контроля) и фенилаланина (на 31% против контроля) отмечено у сорта Эстер при обработке семян селеном. При листовой обработке вегетирующих растений показано наибольшее увеличение содержания фенилаланина (на 19% по сравнению с контролем) и лейцина (на 18% по сравнению с контролем). Фенилаланин, являясь незаменимой аминокислотой, представляет собой источник для синтеза флавоноидов, природных антиоксидантов. Существенную роль в этом играет особое строение фенилаланина – наличие одновременно 2-х противоположных по свойствам функциональных групп: кислотной – COOH и основной – NH_2 [39, 40]. Значение аминокислот лейцина и изолейцина определяется их ролью в прорастании пыльцы, что оказывает существенное влияние на закладку репродуктивных органов и конечную урожайность растений. Метионин – это серосодержащая аминокислота, оказывающая влияние на рост и формирование урожая. Эти незаменимые для человека аминокислоты принимают участие в синтезе белковых соединений [40, 41].

При выращивании растений в условиях засухи были получены сходные закономерности изменения содержания аминокислот в белке зерна обоих сортов. При использовании обработки семян селенитом натрия содержание суммы аминокислот увеличилось на 12% в белке зерна пшеницы сорта Злата, содержание аминокислот в данном варианте возросло в среднем на 9–15%. Использование селена для обработки семян способствовало наибольшему увеличению содержания аминокислот гистидина (на 15%), триптофана, изолейцина и фенилаланина (на 14% по сравнению с контролем без селена). В белке зерна пшеницы сорта Эстер содержание аминокислот увеличилось менее значительно. Выявлена тенденция к увеличению суммы аминокислот. Их суммарное количество увеличилось только на 2%. Среднее содержание аминокислот

увеличилось на 2–6%. Наибольшее увеличение отмечено для аминокислоты триптофана (на 6% по сравнению с контролем).

Использование листовой обработки вегетирующих растений оказало более эффективное действие на содержание аминокислот в зерне пшеницы изученных сортов по сравнению с обработкой семян. У пшеницы сорта Злата сумма аминокислот возросла на 27%, среднее содержание аминокислот в зерне увеличилось на 19–31%. Наибольшие прибавки количества аминокислот в белке зерна пшеницы сорта Злата получены для фенилаланина (31%), изолейцина (30%), метионина (29%). При обработке вегетирующих растений пшеницы сорта Эстер сумма аминокислот увеличилась только на 11%, среднее содержание аминокислот возросло на 8–14%. Содержание серосодержащей аминокислоты метионина, отвечающего за рост растений, возросло на 14%. Содержание аминокислот триптофана, изолейцина и гистидина увеличилось на 13%. Количество остальных аминокислот увеличилось меньше, но достоверно. Аминокислота триптофан является одним из источников для синтеза ауксинов, оказывающих влияние на формирование и рост корневой системы растений [42]. Аминокислота гистидин, являясь протеиногенной и условно незаменимой, оказывает влияние на поступление элементов питания в растения, регулирует работу устьиц, что играет важную роль в стрессовых условиях [40].

Таким образом, можно сделать вывод, что увеличение содержания аминокислот в зерне объясняется возможным прямым или опосредованным участием селена в ряде важнейших физиолого-биохимических процессов, среди которых можно отметить эффективное использование ассимилятов из вегетативной части растений для формирования репродуктивных органов, что позволяет растениям сформировать максимально возможный в данных условиях урожай зерна. При этом положительное действие селена также заключается в регулировании аминокислотного состава белка в зерне пшеницы. При применении селена выявлено увеличение совокупного содержания ключевых аминокислот, которые оказывают существенное влияние на антиоксидантный статус растений и способствуют реализации их адаптивного потенциала.

Возможно, что существенное влияние селена на накопление метионина обусловлено синтезом селенометионина, поскольку пути их образования похожи и разделить их не представляется возможным [20].

Наибольшее действие селена отмечено при выращивании пшеницы сорта Злата по сравнению с пшеницей сорта Эстер, что обусловлено сортовыми различиями, заложенными генетически и различным содержанием белка в зерне.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенного исследования позволили сделать вывод о том, что эффективность применения селенита натрия зависела от сортовой специфики пшеницы, связанной с генетическими характеристиками изученных сортов. Наибольший урожай изученных сортов пшеницы при оптимальных условиях водообеспечения был получен при листовом опрыскивании селеном вегетирующих растений.

Установлено, что формирование урожая зерна растений пшеницы обусловлено влиянием селена на разные стороны продукционного процесса как при оптимальном водообеспечении растений, так и при засухе в критический период роста растений.

Выявлено, что депрессия урожая пшеницы при засухе в критический период роста обусловлена снижением всех ростовых функций растений, что вызвало уменьшение биометрических показателей и озерненности колоса на 35 и 37% у сортов Злата и Эстер соответственно. При этом масса 1000 зерен уменьшилась на 19% только у сорта Эстер, что и послужило причиной резкого уменьшения величины зерновой продуктивности по сравнению с пшеницей сорта Злата.

Применение селена при засухе способствовало улучшению условий формирования репродуктивных органов пшеницы и стимулировало восстановление процессов оттока ассимилятов из вегетативной массы в формирующуюся зерновку, что и обеспечило увеличение урожая зерна пшеницы.

Показано положительное действие селена на содержание аминокислот в зерне пшеницы в зависимости от способов его применения и условий водообеспечения. При применении селенита натрия отмечено наибольшее увеличение содержания таких аминокислот как лейцин, изолейцин, метионин, фенилаланин, триптофан, гистидин. Эти аминокислоты играют ключевую роль в регулировании ростовых процессов, устойчивой активности, ассимиляции азота, что позволяет растениям в оптимальных условиях выращивания сформировать высокий урожай зерна. При дефиците влаги в почве активизация синтеза аминокислот под действием селена позволила растениям активно реализовать адаптивный потенциал и снизить депрессию урожая.

Совместное действие селена и окислительного стресса в основном снижало содержание аминокислот в растениях пшеницы. Можно предположить, что селен участвовал в преодолении последствий окислительного стресса. В то же время отмечено повышение содержания аминокислот в зерне сорта Злата при опрыскивании вегетирующих растений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бондаренко Л.В., Маслова О.В., Белкина А.В., Сухарева К.В.* Глобальное изменение климата и его последствия // Вестн. РЭУ им. Г.В. Плеханова. 2018. № 2(98). С. 84–93.
2. *Шеламова Н.А.* Влияние изменения климата на сельское хозяйство. М., 2013. 83 с.
3. *Папцов А., Шеламова Н.* Мировая агропродовольственная система и глобальные климатические изменения // АПК: эконом., управл.-е. 2017. № 11. С. 81–94.
4. *Владимирский В.К.* Засуха – возможный источник чрезвычайной ситуации // Стратегия гражд. защиты: пробл. и исслед.-я. 2013. Т. 3. № 1(4). С. 147–157.
5. *Сказкин Ф.Д.* Критический период у растений к недостаточному водоснабжению. XXI Тимирязевское чтение. М.: Наука, 1961. 51 с.
6. *Воробейков Г.А., Бредихин В.Н., Лебедев В.Н., Юргина В.С.* Биология критического периода растений в условиях нарушения влажности почвы // Изв. Рос. гос. пед. ун-та им. А.И. Герцена. 2015. № 173. С. 109–173.
7. *Kong L., Wang M., Bi D.* Selenium modulates the activities of antioxidant enzymes, osmotic homeostasis and promotes the growth of sorrel seedling under salt stress // Plant Growth Regul. 2005. V. 45. P. 155–163.
8. *Ibrahim H.M.* Selenium pretreatment regulates the antioxidant defense system and reduces oxidative stress on drought-stressed wheat (*Triticum aestivum* L.) plants // Asian J. Plant Sci. 2014. V. 13. P. 120–128.
9. *Серегина И.И., Ниловская Н.Т.* Роль селена в реализации адаптивной способности пшеницы в условиях окислительного стресса // К 150-летию со дня рожд. Акад. Д.Н. Прянишникова. М., 2015. 152 с.
10. *Серегина И.И., Верниченко И.В., Ниловская Н.Т., Шумилин А.О.* Продуктивность и устойчивость яровой пшеницы в условиях окислительного стресса при применении селена // Агрохимия. 2015. № 3. С. 56–63.
11. *Кузнецов В.В.* Защитное действие селена при адаптации растений пшеницы к условиям засухи: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2004. 24 с.
12. *Foster L.H., Sumar S.* Selenium in health and disease: a review // Crit. Rev. Food. Sci. Nutr. 1997. № 3. P. 218–228.
13. *Вихрева В.А., Блиноватов А.А., Клейменова Т.В.* Селен в жизни растений: моногр. Пенза: РИО ПГСХА, 2012. 222 с.
14. *Телевка М.С.* Роль селена в формировании продуктивности яровой пшеницы в стрессовых условиях: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М: РГАУ–МСХА, 2013. 23 с.

15. *Серегина И.И., Белопухов С.Л.* Защитно-стимулирующая роль микроэлементов и регуляторов роста в растениеводстве. М., 2021. 184 с.
16. *Серегина И.И.* Влияние условий азотного питания, водообеспеченности и применения селена на фотосинтетическую активность растений яровой пшеницы разных сортов // *Агрохимия*. 2011. № 7. С. 17–26.
17. *Лановая М.С., Чернышева Ю.А.* Влияние селена на продуктивность яровой пшеницы в разных условиях водообеспечения // *Энтузиасты аграрной науки: Тр. Кубан. ГАУ. Краснодар*, 2010. Вып. 12. С. 118–120.
18. *Телевка М.С.* Продуктивность и содержание разных форм азота в зерне яровой пшеницы в зависимости от условий водообеспечения при применении селена // *Агрохим. вестн.* 2013. № 3. С. 41–44.
19. *Верниченко И.В., Яковлев П.А.* Изучение протекторного действия Se, Si и Zn на устойчивость зерновых культур к почвенной засухе // *Агрохим. вестн.* 2014. № 4. С. 14–17.
20. *Кирюшина А.П.* Влияние листовой обработки селенитом натрия на продуктивность и качество зерновых культур в условиях разного минерального питания: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М.: Изд-во МГУ, 2017. 24 с.
21. *Кудрявцев А.А.* Химия и технология селена и теллура. М.: Высш. шк., 1961. 288 с.
22. *Шеуджен А.Х., Лебедевский И.А., Бондарева Т.Н.* Биогеохимия и агрохимия селена // *Научн. журн. КубГАУ*. 2013. № 92(08). С. 1–11.
23. *Fairweather-Tait S.J., Bao Y., Broadley M.R., Collings R.* Selenium in human health and disease // *Antioxid. Redox Signal.* 2011. V. 14. № 7. P. 1337–1383.
24. *Голубкина Н.А., Полубояринов П.А., Синдирева А.В.* Селен в продуктах растительного происхождения // *Вопр. питания*. 2017. Т. 86. № 2. С. 63–69.
25. *Торшин С.П., Ягодин Б.А., Удельнова Т.М., Голубкина Н.А., Дудецкий А.А.* Влияние микроэлементов Se, Zn, Mo при разной обеспеченности почвы макроэлементами и серой на содержание Se в растениях яровых пшеницы и рапса // *Агрохимия*. 1996. № 5. С. 54–64.
26. *Вихрева В.А., Хрянин В.Н., Стаценко А.П., Блинохватов А.Ф.* О причинах антистрессовой активности селена // *Бюл. ВИУА им. Д.И. Прянишникова*. М., 2001. № 115. С. 20–21.
27. *Block E., Birringer M., Jiang W., Nakahodo T., Thompson H.J., Toscano P.J., Uzar H., Zhang X., Zhu Z.* Allium chemistry: synthesis, natural occurrence, biological activity, and chemistry of Se-alk(en)yl selenocysteines and their γ -glutamyl derivatives and oxidation products // *J. Agricult. Food Chem.* 2001. V. 49. P. 458–470.
28. *Кобзаренко В.И., Волобуева В.Ф., Серегина И.И., Ромодина Л.В.* Агрохимические методы исследований: Учеб-к. М.: РГАУ–МСХА, 2015. 309 с.
29. *Серегина И.И.* Цинк, селен и регуляторы роста в агробиоценозе. М.: Проспект, 2018. 208 с.
30. *Кумаков В.А.* Физиологическое обоснование моделей сортов пшеницы. М.: Агропромиздат, 1985. 270 с.
31. *Сидоренко В.С., Наумкин Д.В., Наумкина Л.А.* Изменчивость основных морфобиологических признаков ярового ячменя // *Зернобоб. и круп. культуры*. 2012. № 3. С. 35–38.
32. *Сластя И.В.* Влияние обработки соединениями кремния семян и вегетирующих растений на продуктивность сортов ярового ячменя // *Агрохимия*. 2012. № 10. С. 51–59.
33. *Серегина И.И., Верниченко И.В., Ниловская Н.Т., Шумилин А.О.* Продуктивность и устойчивость яровой пшеницы в условиях окислительного стресса при применении селена // *Агрохимия*. 2015. № 3. С. 56–63.
34. *Серегина И.И., Ниловская Н.Т., Остапенко Н.В.* Роль селена в формировании урожая зерна яровой пшеницы // *Агрохимия*. 2001. № 1. С. 44–50.
35. *Блинохватов А.Ф., Вихрева В.А., Стаценко А.П., Хрянин В.Н.* О причинах антистрессовой активности селена // *Бюл. ВИУА*. 2001. № 115. С. 20. 27.
36. *Вихрева В.А., Хрянин В.Н., Гинс В.К., Блинохватов А.Ф.* Адаптогенная роль селена в высших растениях // *Вестн. Башкир. ун-та*, 2001. № 2(11). С. 65–66.
37. *Яковлев П.А.* Влияние микроэлементов на азотный обмен и устойчивость тритикале и пшеницы к стрессовым факторам внешней среды: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2014. 26 с.
38. *Демина Л.Ю., Корнышев В.Н.* Влияние марганца, хрома и селена на аминокислотный состав белка мангольда // *Гавриш*. 2006. № 2. С. 13–16.
39. *Ленинджер А.* Основы биохимии. В 3-х т. Т. 2. Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 368 с.
40. *Сыровая А.О., Шаповал Л.Г., Макаров В.А., Петюнина В.Н., Грабовецкая Е.Р., Андреева С.В., Наконечная С.А., Бачинский Р.О., Лукьянова Л.В., Козуб С.Н., Левашова О.Л.* Аминокислоты глазами химиков, фармацевтов, биологов. В 2-х т. Т. 2 Харьков: Щедра садиба плюс, 2015. 268 с.
41. *Браунштейн А.Е.* Биохимия аминокислотного обмена. М.: Изд-во АН СССР, 1949. 426 с.
42. *Котляров В.В., Федулов Ю.П., Доценко К.А., Котляров Д.В., Яблонская Е.К.* Применение физиологически активных веществ в агротехнологиях. Краснодар: КубГАУ, 2014. 169 с.

Influence of Selenium on the Yield and Content of the Amino Acid Composition of Spring Wheat Grain under Optimal Conditions of Water Supply and during Drought

I. I. Seregina*

*Russian State Agrarian University—MSHA named after K.A. Timiryazev,
ul. Timiryazevskaya 49, Moscow 127550, Russia*

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

In model experiments in soil culture, the effect of various methods of applying sodium selenite on the formation of yield and amino acid composition of grain varieties of spring wheat Zlata and Ester, depending on water supply conditions, was studied. Sodium selenite was introduced by pre-sowing seed treatment and leaf treatment of vegetative plants. The study simulated optimal water supply conditions and soil moisture deficiency during the critical period of plant growth. The role of selenium in the regulation of the production process and the formation of the amino acid composition of spring wheat grain was studied. It was found that the production process of wheat plants, both under optimal water supply and in drought conditions, depended on the method of application of selenium and the varietal characteristics of spring wheat. The results allowed us to assume that selenium activated the attenuating ability of the ear by enhancing its acceptor properties. Under these conditions, the grains were better provided with assimilates. This made it possible to form the maximum possible yield of wheat grain. In conditions of drought, during leaf treatment of plants with sodium selenite, favorable conditions were created for the formation of reproductive organs of wheat, which stimulated the restoration of the processes of assimilate outflow from the vegetative mass into the forming grains. This made it possible to influence production processes and reduce the depression of wheat crop formation. The use of selenium revealed an increase in the total content of key amino acids, which had a significant effect on the antioxidant status of plants and contributed to the realization of their adaptive potential. The positive effect of selenium on the content of a number of amino acids, including on the assimilation of methionine, was revealed, which was probably due to the synthesis of selenomethionine, since the ways of their formation are similar and it is not possible to separate them. The greatest effect of selenium was observed in the cultivation of wheat of the Zlata variety compared with wheat of the Ester variety, which was determined by varietal differences inherent genetically and the unequal protein content in the grain.

Keywords: spring wheat varieties, selenium, yield of grain, amino acid composition of grain, water supply conditions.

УДК 581.192:632.122.1(571.53./55)

ЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ЛИСТЬЕВ БЕРЕЗЫ ПОВИСЛОЙ (*Betula pendula* Roth) В РАЙОНЕ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЗАБАЙКАЛЬЯ

© 2024 г. В. П. Макаров^{1,*}, Р. А. Филенко¹, И. Е. Михеев¹,
Т. В. Желибо¹, Е. А. Банщикова¹

¹Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН,
672014 Чита, ул. Недорезова, 16а, Россия

*E-mail: vm2853@mail.ru

Изучили влияние производства по добыче золота на концентрацию химических элементов в листьях *Betula pendula* Roth. Исследовали интенсивность поглощения растением ряда химических элементов, возможности использования березы как лекарственного и кормового растения, а также для мониторинга изменения среды обитания. Исследование проведено в растительных сообществах, расположенных на производственных объектах и природных местопроизрастаниях в районе Балейского золоторудного месторождения: хвостохранилищах золотоизвлекательных фабрик (ЗИФ-1 и ЗИФ-2), дражном полигоне, отвале штольни Средне-Голготайского месторождения золота, хвостохранилище после переработки моноцитов, а также в природных растительных сообществах, расположенных в окрестностях г. Балей на 13-ти пробных площадях в 2008, 2008 и 2021 гг. Концентрации элементов в листьях в порядке убывания располагались в следующей последовательности: Ca > Mg > P > Mn > Fe > Zn > Na > Ba > V > Cr > Ni > As > Cu > Mo > Sb > Pb > Co > Li > V > Cd > Bi > Se > Be. По отношению к кларку наземных растений концентрации элементов находились в следующем порядке: Cr > As > Sb > Li > Ni > Ba > Fe > Mo > Bi > Co > Zn > Mg > Кларк > Mn > P > Ca > Cu > V > Pb > Se > Cd > V > Be > Na. Поглощение As на производственных объектах превышала норму, установленную для лекарственного растительного сырья. Использование веточного корма на ряде площадей из-за высокого уровня Zn, Fe, Sb, Ni, Cr, Co, As, Cd не допустимо. Получен относительно высокий коэффициент биологического поглощения листьями березы Zn, Mn, P, Ca, Mg.

Ключевые слова: *Betula pendula*, поглощение химических элементов, месторождение золота.

DOI: 10.31857/S0002188124040115, **EDN:** dlgrmj

ВВЕДЕНИЕ

Основным фактором, определяющим содержание химических элементов в почвах и растениях, является геохимия ландшафта. Концентрация химических элементов в растениях также обусловлена экологическими условиями места произрастания и биологическими особенностями вида. Сведения о составе элементов в растениях важны для контроля качества растительного сырья, получаемого из растений, а также мониторинга загрязнения окружающей среды токсичными металлами.

Береза повислая (*Betula pendula* Roth) семейства Betulaceae имеет обширный евро-сибирский ареал, за пределами России растет в Средней и Западной Европе. В районе исследования (Балейский р-н Забайкальского края) площадь березовых лесов составляет 57% от лесопокрытой площади. Березу используют для получения древесины, в защитном

лесоразведении, как пищевое (сок), лекарственное (почки, листья, бетулин, чага, березовый деготь, активированный березовый уголь), кормовое (веточный корм) и декоративное растение.

Фитохимические исследования видов *Betula* привели к выделению тритерпеноидов, диарилгептаноидов, фенилбутаноидов, лигнанов, фенолов и флавоноидов. По данным экспериментов, сырые экстракты, фракции и фитохимические компоненты, выделенные из березы, показали широкий спектр фармакологического действия, такие как иммуномодулирующее, противовоспалительное, антимикробное, противодиабетическое, дерматологическое, гастропротекторное и гепатопротекторное. Широко изучены антиканцерогенные эффекты коры березы, бетулина, а также бетулиновой кислоты. Обнаружено, что *B. pendula* потенциально полезна при лечении дегенеративных заболеваний суставов [1].

Продемонстрирована антиоксидантная способность экстракта сухих листьев березы. Их можно использовать в качестве природного источника антиоксидантов, для получения продуктов с высокой ценностью, полезных для предотвращения различных состояний, связанных с окислительным стрессом [2]. Исследования биоактивных комплексов чаги последних лет свидетельствуют о том, что многие из них можно использовать в таргетной терапии злокачественных новообразований [3].

Березу повислую широко используют для мониторинга загрязнения окружающей среды. Например, изучение *B. pendula*, произрастающей в условно чистом природном местообитании и на городских территориях, показало существенные различия по содержанию в их органах и тканях тяжелых металлов (ТМ), таких как Cd, Pb, Cu, Zn, Ni, Fe, Mn, в зависимости от условий произрастания. В листьях растений, находящихся в городских условиях, отмечено повышенное содержание большинства изученных ТМ, а концентрации Cd и Pb не только превышали фоновые для растений показатели, но даже приближались к нижнему уровню их предельно допустимых концентраций [4]. Установлено, что среди представителей листовых пород (береза, липа, рябина, тополь) хорошо выраженной способностью к аккумуляции ТМ обладает береза, для которой характерно накопление самых токсичных элементов – Cd, Pb, Ni, а также Mn. [5]. В зоне действия полиметаллического месторождения и металлургического комплекса в республике Казахстан в горнодобывающем ландшафте для *B. pendula* характерна свинцово-цинковая специализация, в урбопромышленном ландшафте – цинково-кадмиевая [6].

Наиболее высокий суммарный уровень металлов (Mn, Fe, Zn, Sr, Vg, Rb) был отмечен в листьях древесных растений: клена остролистного, березы повислой и липы сердцевидной. Из изученных элементов растения больше всего накапливали Mn и Fe. Накопление Mn в листьях в большей степени было характерно для древесных растений, чем для кустарников или трав [7].

Листья березы интенсивнее хвои ели и сосны аккумулируют Cu, Ni и Mn [8, 9]. Предлагают использовать листья березы в качестве биоиндикатора загрязнения цинком [10], биомониторинга техногенных выбросов благодаря ее способности биоаккумулировать Mn, Fe, Ni, Zn, Cd и Pb [11].

Цель работы – выяснить влияние разработки месторождения золота в Забайкальском крае на элементный состав листьев березы повислой, а также пригодность использования растения как источника лекарственного сырья и в мониторинге окружающей среды.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование провели в районе Балейского золоторудного месторождения: хвостохранилищах золотоизвлекательных фабрик (ЗИФ-1 и ЗИФ-2), дражном полигоне, отвале штольни Средне-Голготайского месторождения золота, хвостохранилище после переработки моноцитов, а также в природных растительных сообществах, расположенных в окрестностях г. Балей на 13-ти пробных площадях (табл. 1).

На хвостохранилищах ЗИФ-1 и ЗИФ-2, отвалах штольни Средне-Голготайского месторождения золота проведен отбор 5-ти проб почвы и листьев березы в августе 2008, 2009 гг. Почву отбирали в прикорневой зоне березы в пределах 20 см. В июле 2021 г. на других 8-ми пробных площадях отбирали только листья березы.

Анализ почв и техноземов на валовое содержание химических элементов проводили в ГИН СО РАН (г. Улан-Удэ) следующими методами: P_2O_5 – фотометрическим, CaO, MgO, MnO, Fe_2O_3 – атомно-абсорбционным, Na_2O – пламенно-фотометрическим. Анализ проведен аналитиками В.А. Ивановой, Л.В. Митрофановой. Содержание V, Cr, Ni, Co определяли атомно-эмиссионным спектральным методом (аналитик М.Г. Егорова). Анализ Zn, As, Pb, Sb, Ba выполняли на поляризационном спектрометре ЭДПС-1 (аналитики Б. Жалсараев, Ж. Ринчинова).

Использовали нормативную документацию: инструкции научного совета по аналитическим методам Всероссийского научно-исследовательского института минерального сырья № 172-ХС, 138-Х, 231-Х, 3-Х, 188-Х, 230-Х.

Концентрацию химических элементов в растительных образцах определяли в лаборатории физико-химических исследований Института тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина (г. Хабаровск) (аналитики В.О. Крутикова, А.Ю. Петрова).

При пробоподготовке для определения концентраций микроэлементов в пробах за основу была использована методика ПНД Ф 16.1:2.3:11–98 “Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой” (1998 г.). В качестве стандартных образцов для поверки и калибровки прибора применяли ДВА, ДВБ (Дальний восток РФ), ВНВО-1, STM-1 (США), JG-1a, JR-1 (Япония) и др. Учитывая, что наиболее корректной оценкой предела обнаружения в аналитических методах является экспериментальное нахождение такой величины [12], концентрации Se, Sb, Pb, Be приведены ниже порога по методике ПНД Ф 16.1:2.3:11–98.

Таблица 1. Характеристика пробных площадей

Площадь, №	Координаты, °	Место расположения	Растительное сообщество	Антропогенное воздействие	Относительная суммарная концентрация элементов, %
1	N51.565050 E116.562060	Долина ручья Холбонский на юго-восточном склоне хребта Борщовочный	Березняк разнотравный	Прямого воздействия нет	5
2	N51.541200 E116.596250	Северо-восточный склон около поймы р. Унда	Степь разнотравная, закустаренная	Прямого воздействия нет	4
3	N51.545570 E116.600760	Пойма р. Унда	Прирусловое древесно-кустарниковое	Воздействие дражной разработки 40-летней давности	5
4	N51.568220 E116.590890	Долина ручья Кибирева	Березняк разнотравный	Прямого воздействия нет	4
5	N51.537270 E116.601590	Пойма р. Унда	Прирусловое древесно-кустарниковое	Воздействие дражной разработки 40-летней давности	5
6	N51.552420 E116.590940	Хвостохранилище после переработки моноцита	Сосняк лишайниковый	Воздействие хвостохранилища 60-летней давности	5
7	N51.572960 E116.642970	Обрывистый берег обводненного северного карьера вблизи г. Балей	Древесно-кустарниковое	Воздействие эрозии грунта и жилой зоны г. Балей	5
8	N51.563217 E116.619533	Хвостохранилище ЗИФ-1	Древесно-кустарниковое	Воздействие хвостохранилища 50-летней давности	11
9	N51.487933 E116.657900	Отвалы штольни Средне-Голготайского месторождения золота	Древесно-кустарниковое	Влияние насыпного отвала горных пород	11
10	N51.549367 E116.644583	Хвостохранилище ЗИФ-2 (южная часть)	Древесно-кустарниковое	Воздействие хвостохранилища 50-летней давности	13
11	N51.549367 E116.644583	Хвостохранилище ЗИФ-2 (южная часть)	Древесно-кустарниковое	Воздействие хвостохранилища 50-летней давности	14
12	N51.550267 E116.63185	Хвостохранилище ЗИФ-2 (западная часть)	Древесно-кустарниковое	Воздействие хвостохранилища 50-летней давности	17
13	N51.553167 E116.636200	Хвостохранилище ЗИФ-2 (северная часть)	Древесно-кустарниковое	Воздействие хвостохранилища 50-летней давности	3

Статистическую обработку полученных данных провели с помощью программы Microsoft Excel 2010. В разделе “Описательная статистика” определены ошибки средних, среднеквадратичное отклонение и коэффициенты вариации, минимальные и максимальные данные. Для определения выбросов полученных данных использован критерий Граббса.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследована концентрация 24-х химических элементов в листьях березы повислой (*Betula pendula* Roth). Средние концентрации химических элементов в листьях березы на пробных площадях в порядке убывания располагались в следующей

последовательности: Ca > Mg > P > Mn > Fe > Zn > Na > Ba > B > Cr > Ni > As > Cu > Mo > Sb > Pb > Co > Li > V > Cd > Bi > Se > Be.

По отношению к кларку наземных растений, средняя концентрация химических элементов в листьях березы находилась в следующем порядке: Cr > As > Sb > Li > Ni > Ba > Fe > Mo > Bi > Co > Zn > Mg > **Кларк** > Mn > P > Ca > Cu > B > Pb > Se > Cd > V > Be > Na.

Из числа жизненно необходимых макроэлементов определено накопление листьями березы Ca, Mg, P, Na.

Кальций. Среднее накопление элемента в районе исследования было в 2 раза меньше кларка наземных растений. Концентрация кальция на пробных площадях значительно варьировала от 2190 до 22600 мг/кг ($C_V = 85\%$). Близки к кларку концентрации элемента в образцах, взятых на отвалах штольни Средне-Голготайского месторождения золота и пробных площадях ЗИФ-1 (табл. 2).

Магний. Концентрация элемента в листьях березы на большинстве пробных площадей была близка к кларку наземных растений. В 2.0–2.5 раза концентрация магния была больше кларка на ряде пробных площадей ЗИФ-1 и ЗИФ-2.

Фосфор. Концентрация фосфора в листьях березы на большинстве пробных площадей была близка к кларку наземных растений. Лишь на отвале Средне-Голготайского месторождения золота и пробной площади (п.п.) № 13 ЗИФ-2 концентрация элемента была меньше кларка в 3–4 раза.

Натрий. Концентрация элемента в листьях березы на пробных площадях была меньше кларка наземных растений в 9–90 раз. Отличались низкой концентрацией элемента по отношению к кларку наземных растений образцы листьев на площадях № 2, 3, 6, 7. Средняя концентрация натрия на площадях была меньше кларка в 25 раз (48.1 ± 11.0 мг/кг). В то же время в условиях высокогорья Северного Урала концентрация натрия в листьях березы повислой находилась в пределах 1780–2070 мг/кг [14]. На территории г. Архангельска концентрация натрия в листьях березы была в пределах 206–679 мг/кг [15]. Это свидетельствовало о значительном влиянии геохимических особенностей почвы в месте произрастания вида.

Жизненно необходимые микроэлементы. Марганец. Концентрация магния в листьях березы варьировала в широких пределах от 76 до 2110 мг/кг ($C_V = 104\%$). Однако среднее накопление на пробных площадях было близко к кларку наземных растений.

Железо. Средняя концентрация железа в листьях березы на пробных площадях превышала кларк наземных растений в 2 раза

и характеризовалась значительной изменчивостью — от 84 до 782 мг/кг ($C_V = 85\%$). Относительно высокая концентрация отмечена на пробных площадях хвостохранилища ЗИФ-2.

Цинк. Превышение кларка концентрации элемента в наземных растениях в 1.6–4.6 раза отмечено преимущественно в листьях березы, отобранных на нарушенных площадях — хвостохранилищах ЗИФ-1 и ЗИФ-2. В то время как в природных сообществах концентрация элемента была близка или в 2 раза меньше кларка.

Хром. Концентрация элемента в листьях березы на пробных площадях характеризовалась сильной изменчивостью ($C_V = 177\%$). Средняя концентрация хрома в листьях превышала кларк наземных растений в 54 раза. Выделялись повышенным накоплением хрома березы, произрастающие на хвостохранилищах ЗИФ-1 и ЗИФ-2, а также в березовом лесу долины ручья Холбонский на юго-восточном склоне хребта Борщовочный.

Медь. Среднее накопление элемента в листьях березы на пробных площадях было меньше кларка наземных растений в 2 раза. Варьирование концентрации было относительно не высоким ($C_V = 64\%$).

Молибден. Средняя концентрация элемента в районе исследования была в 2 раза больше кларка наземных растений и характеризовалась значительным варьированием на пробных площадях ($C_V = 144\%$), от 0.05 до 7.5 мг/кг. Превышение кларка наблюдали преимущественно на нарушенных производственной деятельностью площадях.

Кобальт. Средняя концентрация элемента в районе исследования превышала кларк наземных растений в 1.7 раза. Варьирование накопления кобальта на пробных площадях было высоким ($C_V = 81\%$), изменялось от 0.05 до 2.11 мг/кг. Превышение кларка наблюдали преимущественно на нарушенных производственной деятельностью площадях, а также в березовом лесу в долине ручья Холбонский на юго-восточном склоне хребта Борщовочный.

Селен. Средняя на пробных площадях концентрация элемента была меньше кларка наземных растений в 3.3 раза. Накопление селена значительно варьировало на площадях ($C_V = 120\%$), от 0.001 до 0.21 мг/кг. Относительно низкой концентрацией элемента отличалась береза, произрастающая в природных сообществах (меньше кларка наземных растений в 200 раз). И, напротив, концентрация элемента была близка к кларку на площадях произрастания березы, измененных производственной деятельностью.

В Забайкалье отмечен дефицит селена в почвах, растениях и водах, связанный с некоторыми геологическими и климатическими особенностями.

Таблица 2. Концентрация химических элементов в листьях березы повислой, мг/кг

Элемент	Пробные площади, №													X _{ср.} ± S _x	%	Кларк в наземных растениях [13]
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13			
Жизненно необходимые макроэлементы																
Ca	4000	3190	4070	3110	3820	3780	3360	11000	18100	17600	17200	22600*	2200**	8770 ± 2060	85	18000
Mg	2700	2830	2690	2740	2570	2730	3090	8530*	2840	5790	7050	7350	1550**	4030 ± 630	57	3200
P	2360	1540	210	2160	2480	2040	2380	1460	628	2110	2870*	1920	899	1930 ± 180	33	2300
Na	37.9	14.6	17	81.2	30	12.9	13.4	37.4	28.5	47.6	53.5	132*	119.7	48.1 ± 11.0	82	1200
Жизненно необходимые микроэлементы																
Mn	375	158	748	128	140	877	506	117	76	430*	1190	669	172	559 ± 162	104	630
Fe	460	84	104	153	128	90	93	146	152	328	594	593	782	285 ± 67	85	140
Zn	59.3	55.8	90.4	74	121	77.4	144	303	218	226	229	461*	47.3	162 ± 34	75	100
Cr	46.5	0.4	0.5	0.8	0.9	0.4	0.5	0.8	0.7	3.3	32.7	6.5	65.9*	12.3 ± 6.0	177	0.23
Cu	10.2	3.2	3.9	17.6*	4.8	4	5.2	4.1	11.8	5	4.9	6.7	3.8	6.5 ± 1.2	64	14
Mo	0.39	0.05	0.58	0.27	0.78	0.13	0.3	1.18	7.54*	1.67	1.69	6.55	0.96	1.7 ± 0.7	144	0.9
Co	1.16	0.05	0.27	0.13	0.38	1.25	0.57	0.62	0.31	2.11*	2.1	1.12	0.95	0.85 ± 0.19	81	0.5
Se	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.03	0.01	0.05	0.09	0.17	0.15	0.21*	0.08	0.061 ± 0.020	120	0.2
Условно жизненно необходимые микроэлементы																
B	10.8	17.2	13.6	13.9	8.9	15.4	13	18.6	17	45.1*	30.8	30.8	8.8	18.8 ± 2.9	56	50
Ni	37.6	1.6	4.6	1	2.6	6.5	4.9	1.1	1.5	6.5	22.1	8.5	31.5	10.0 ± 3.4	123	3
As	0.76	0.001**	0.001**	0.23	0.09	0.001**	0.13	1.9	26.3*	9.7	16.5	18.2	13.3	6.7 ± 2.5	135	0.2
Li	0.14	0.04**	0.05	0.13	0.11	0.06	0.04	0.25	0.11	0.85	1.03	2.4*	2.06	0.56 ± 0.22	145	0.1
V	0.48	0.08	0.1	0.18	0.16	0.07	0.06**	0.17	0.15	0.38	0.8	0.9	1.35*	0.38 ± 0.11	107	1.6
Токсичные микроэлементы																
Ba	32	38.2	73.9	19.7	20.5	96.5*	24.2	36.4	10.9	11.8	15.1	28.6	4.8	32.0 ± 7.0	82	14
Sb	0.04	0.003**	0.004	0.04	0.01	0.003**	0.01	0.11	3.71	1.19	3.82	5.51*	2.7	1.3 ± 0.5	146	0.06
Pb	0.95	0.03**	0.06	4.16*	0.09	0.07	0.12	0.39	1.75	0.64	0.92	1.27	0.86	0.87 ± 0.31	129	2.7
Cd	0.05	0.06	0.19	0.05	0.03	0.2	0.16	0.06	0.75*	0.15	0.47	0.15	0.02	0.18 ± 0.06	116	0.6
Bi	0.17	0.001**	0.001**	0.36	0.001**	0.001**	0.001**	0.001**	0.15	0.08	0.11	0.13	0.39*	0.107 ± 0.037	126	0.06
Be	0.01	0.003**	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.07*	0.03	0.03	0.019 ± 0.005	94	0.1
Относительная сумма, %																
5	4	5	4	5	5	5	5	11	11	13	14	17	3			

* Максимальная концентрация элемента. ** Минимальная концентрация элемента.

Дефицит селена чаще всего обнаруживался в районах, где распространены гранитоиды и пойменные лугово-аллювиальные типы почв. В почвах, содержащих карбонатные подпочвы, показатели подвижности селена значительно больше. Усугубляет нехватку селена повышенное содержание мышьяка и ТМ, попадающих в ландшафты в результате добычи золота и разработки многочисленных полиметаллических месторождений, а также за счет других не менее важных факторов, таких как интенсивность эксплуатации сельскохозяйственных земель или распространение мерзлоты [16].

Условно жизненно необходимые микроэлементы. Бор. Средняя концентрация элемента в листьях березы на пробных площадях была меньше кларка в 2.7 раза и варьировала от 8.8 до 45.1 мг/кг. Близкое к кларку наземных растений накопление элемента обнаружено на площадях ЗИФ-2.

Никель. Средняя концентрация элемента в листьях березы на пробных площадях была больше кларка в 3.3 раза и варьировала от 1.0 до 37.6 мг/кг. Значительное превышение концентрации элемента по отношению к кларку было на площадях хвостохранилища ЗИФ-2, а также березовом лесу в долине ручья Холбонский на юго-восточном склоне хребта Борщовочный.

Мышьяк. Концентрация элемента в листьях березы характеризовалась высоким варьированием на пробных площадях ($C_V = 135\%$), от 0.001 до 26.3 мг/кг. Наибольшие концентрации мышьяка были на нарушенных производственной деятельностью площадях. Это связано с тем, что лежалые хвосты обогатительных фабрик комбината “Балейзолото” наряду с золотом и серебром содержат наиболее высокие концентрации мышьяка, а также сурьмы и цинка [17]. На ряде площадей, занятых природными растительными сообществами, накопление мышьяка в листьях было значительно меньше кларка.

Литий. Средняя концентрация элемента в листьях березы была больше кларка в 5.6 раза и характеризовалась значительным варьированием на пробных площадях ($C_V = 145\%$), от 0.04 до 2.4 мг/кг. Относительно высоким накоплением лития отличались листья березы на площадях хвостохранилищ ЗИФ-1 и ЗИФ-2.

Ванадий. Средняя концентрация элемента в районе исследования была меньше кларка наземных растений в 4.2 раза. Варьирование его накопления на пробных площадях было значительным ($C_V = 107\%$), от 0.06 до 1.35 мг/кг. Максимальная концентрация элемента отмечена на одной из площадей хвостохранилища ЗИФ-2.

Токсичные микроэлементы. Барий. В районе исследования средняя концентрация бария в листьях березы была больше кларка наземных растений в 2.3

раза, и варьировала на пробных площадях от 4.8 до 96.5 мг/кг. Наибольшее накопление элемента в листьях березы отмечено на хвостохранилище моноцитов. Закономерности изменения концентрации элемента в природных местах произрастания березы и на площадях, нарушенной производственной деятельностью, не обнаружены.

Сурьма. Средняя концентрация элемента в районе исследования была в 21.7 раза больше кларка наземных растений. Относительно высокие концентрации сурьмы были обнаружены на площадях, нарушенных производственной деятельностью: отвале штольни Средне-Голготайского месторождения золота, хвостохранилищах ЗИФ-1 и ЗИФ-2.

Свинец. Среднее содержание свинца в листьях березы в районе исследования было в 3 раза меньше кларка наземных растений, за исключением пробных площадей в березняке, расположенном в долине ручья Кибирева, где накопление элемента было в 1.5 раза больше кларка. Закономерности изменения концентрации элемента на пробных площадях не обнаружено.

Кадмий. Токсическая доза для человека равна 3–330 мг, летальная — 1.5–9.0 г. По отношению к кларку наземных растений средняя концентрация кадмия в листьях березы в районе исследования была в 3.3 раза меньше. Близкое к кларку накопление элемента в листьях березы отмечено на отвале штольни Средне-Голготайского месторождения золота и хвостохранилище ЗИФ-2.

Висмут. Средняя концентрация элемента в листьях березы в районе исследования была в 1.8 раза больше кларка наземных растений и отличалась значительным варьированием на пробных площадях от 0.001 до 0.39 мг/кг ($C_V = 126\%$). Наибольшее накопление элемента в большей мере приурочено к нарушенным местопроизрастаниям березы.

Бериллий. Средняя концентрация элемента в листьях березы в районе исследования была 5.3 раза меньше кларка наземных растений.

Таким образом, из числа жизненно необходимых элементов превышала кларк наземных растений средняя концентрация в листьях березы повислой Fe, Mo, Co, Zn, Mg, Ni, Li, особенно Cr (в 55 раз) и As (в 34 раза). Концентрация Mn и P была близка кларку, накопление в листьях березы Ca, Cu, Se, B, V и особенно Na (в 25 раз) значительно меньше кларка, что возможно было связано с геохимией грунта и почв района исследования. Концентрация в листьях березы токсичных элементов Ba, Bi и особенно Sb (больше в 21.7 раза) превышала кларк наземных растений. Накопление Pb, Cd и Be было меньше кларка наземных растений.

Листья и почки березы повислой используют в официальной медицине. Превышение предельно

допустимого содержания мышьяка, согласно требованиям ОФС.1.5.3.0009.15 [18] в лекарственном сырье, отмечено на хвостохранилищах золотоизвлекательных фабрик и особенно на отвалах штольни Средне-Голготайского месторождения. Концентрация мышьяка на этих объектах превышала норму в 4–53 раза. Концентрация других элементов в листьях березы, таких как Pb, Cd, на содержание которых установлены ПДК, находилась в норме.

Население района исследования может использовать березу в качестве веточного корма для мелкого рогатого скота и кроликов. В России установлен максимально-допустимый уровень (МДУ) химических элементов в кормах для сельскохозяйственных животных (грубые и сочные корма) [19]. При заготовке веточного корма важно учитывать, что концентрация элементов в листьях березы на ряде пробных площадей превышала МДУ: цинка – в 1.2–9.0 раз, железа – в 1.5–8.0, сурьмы – в 2.3–11.0, никеля – в 2–12, хрома – в 2.0–132, кобальта – в 1.2–2.1, мышьяка – в 1.5–53, кадмия – в 1.6–2.5 раза. Анализ образцов почвы на валовое содержание химических элементов провели на пробных площадях, расположенных на территории производственных объектов: отвале штольни Средне-Голготайского месторождения золота (пробная площадь № 9), хвостохранилищах ЗИФ-1 (пробная площадь № 8) и ЗИФ-2

(пробные площади № 10–13). Более высокое содержание большинства исследованных элементов было на отвалах штольни. Значительно превышало кларк земной коры содержание в почве мышьяка, сурьмы, а также свинца и хрома. Содержание других элементов было близко к кларку или в 2 раза меньше его (табл. 3).

Коэффициенты биологического поглощения химических элементов были определены на площадях, нарушенных производственной деятельностью: хвостохранилищах ЗИФ-1 и ЗИФ-2, отвале штольни Средне-Голготайского месторождения золота. Результаты свидетельствовали об относительно высоком накоплении в листьях березы Zn, Mn, P, Ca, Mg и низком накоплении Ba, Ni, Pb, As, Fe, Sb, Na и V (табл. 4).

Концентрации ряда химических элементов в листьях березы были корреляционно связаны между собой. Например, величина поглощения цинка корреляционно связана с концентрацией молибдена, селена, кальция, магния, мышьяка – с величиной поглощения кальция, молибдена, сурьмы, кадмия и селена (табл. 5).

Корреляционные связи между концентрациями химических элементов могут быть объяснены биохимическими особенностями вида растения и геохимией ландшафта.

Таблица 3. Валовое содержание химических элементов в почве, мг/кг

Элемент	Кларк в земной коре [20]	Номер пробной площади						$X_{cp} \pm s_x$	$C_V, \%$
		8	9	10	11	12	13		
Fe	46500	21475	31300*	17000	26000	19000	15000**	21600 ± 2480	28
Ca	29600	12850	32500*	10939	4218**	12798	4862	13000 ± 4200	79
Mg	18700	5900	18500*	6995	3618	9527	3136**	7950 ± 2320	71
Na	25000	3300	14000*	9201	3191**	6530	6159	7060 ± 1660	58
P	930	950	1900*	785	1221	1090	698**	1110 ± 180	39
As	1.7	626	1290	560	1530*	880	860	958 ± 155	40
Ba	650	400	700*	520	450	480	380**	488 ± 47	24
Mn	1000	500	500*	400	200**	400	300	383 ± 48	31
Cr	83	47	200	135	230*	115	82	135 ± 29	52
Sb	0,5	67	113*	–	–	–	–	90 ± 23	36
Zn	83	62	142*	46	35**	47	51	64 ± 16	62
Pb	16	18	150*	–	–	19	–	62 ± 44	122
V	90	45	55	60	82	83*	40**	61 ± 7	30
Ni	58	33	76.5*	–	–	–	–	55 ± 22	57
Co	18	7	14*	7.7	9.5	11	7.7	9.5 ± 1.1	28

* Максимальная концентрация элемента. ** Минимальная концентрация элемента.

Таблица 4. Коэффициенты биологического поглощения (КБП) элементов листьями березы повислой

Элемент	Пробная площадь, № (местоположение)						Среднее
	8 (ЗИФ-1)	10 (ЗИФ-2)	11 (ЗИФ-2)	12 (ЗИФ-2)	13 (ЗИФ-2)	9 (отвал штольни)	
Zn	4.9	4.9	6.5	9.8	0.93	1.5	4.76 ± 1.34
Mn	0.24	5.3	6.0	1.7	0.57	0.15	2.33 ± 1.08
P	1.5	2.7	2.4	1.8	1.3	0.33	1.66 ± 0.34
Ca	0.85	1.61	4.1	1.8	0.45	0.56	1.56 ± 0.56
Mg	1.50	0.83	1.95	0.80	0.49	0.15	0.95 ± 0.27
Cr	0.018	0.024	0.142	0.057	0.80	0.004	0.17 ± 0.13
Co	0.089	0.274	0.221	0.102	0.12	0.022	0.14 ± 0.04
Ba	0.091	0.023	0.000	0.060	0.013	0.016	0.03 ± 0.01
Ni	0.035	—	—	—	—	0.020	0.03 ± 0.01
Pb	0.022	—	—	0.067	—	0.012	0.03 ± 0.02
As	0.003	0.017	0.011	0.021	0.015	0.020	0.02 ± 0.00
Fe	0.007	0.019	0.023	0.031	0.052	0.005	0.02 ± 0.01
Sb	0.002	—	—	—	—	0.033	0.02 ± 0.02
Na	0.011	0.005	0.017	0.020	0.019	0.002	0.01 ± 0.00
V	0.004	0.006	0.010	0.011	0.034	0.003	0.01 ± 0.01

Таблица 5. Коэффициенты корреляции Пирсона поглощения химических элементов листьями березы повислой (уровень статистической значимости 0.1%)

Элемент	Ca	Mg	Mn	Fe	Zn	Na	B	Cr	Ni	As	Cu	Mo	Sb	Pb	Co	Li
Mg	0.72															
Zn	0.87	0.85														
Na				0.78												
B	0.79	0.69	0.82													
Cr				0.83												
Ni				0.78				0.95								
As	0.78															
Mo	0.80				0.70					0.86						
Sb	0.79									0.92		0.82				
Pb											0.92					
Co			0.81				0.71									
Li				0.86		0.89							0.78			
V				0.98		0.83		0.81	0.71							0.90
Cd										0.72						
Bi						0.73								0.75		
Se	0.89				0.78		0.82			0.77			0.84		0.69	0.77
Be				0.68											0.73	

ВЫВОДЫ

Концентрация большинства исследованных химических элементов в листьях березы в районе исследования характеризовалась высоким уровнем изменчивости, что вероятно было связано с геохимическим разнообразием ландшафта. Максимальное поглощение большинства химических элементов было отмечено на площадях, измененных производственной деятельностью.

В природных растительных сообществах, расположенных на хребте Борщовочный, была обнаружена максимальная концентрация Cu, Ni и Pb в листьях березы, что можно объяснять геохимическими особенностями почвы.

Использование листьев березы как лекарственного сырья на ряде исследованных участков недопустимо из-за высокой концентрации в них As, превышающей установленную норму. Накопление в листьях березы Zn, Fe, Sb, Ni, Cr, Co, As, Cd больше максимального допустимого уровня ограничивает использование веточного корма из березы на ряде площадей.

Свойство листьев березы накапливать относительно высокое количество цинка и марганца может быть использовано для экологического и геохимического мониторинга окружающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rastogi S., Pandey M.M., Rawat A.K.S.* Medicinal plants of the genus *Betula* – Traditional uses and a phytochemical–pharmacological review // *J. Ethnopharmacol.* 2015. V. 159. P. 62–83. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2014.11.010>
2. *Penkov D.* Antioxidant activity of dry birch (*Betula pendula*) leaves extract // *Folia Med (Plovdiv)*. 2018. V. 60. № 4. P. 571–579. <https://doi.org/10.2478/folmed-2018-0035>
3. *Змитрович И.В., Денисова Н.П., Баландайкин М.Э., Белова Н.В., Бондарцева М.А., Переведенцева Л.Г., Перелыгин В.В., Яковлев Г.П.* Чага и ее биоактивные комплексы: история и перспективы // *Формулы фармации.* 2020. Т. 2. № 2. С. 84–93. <https://doi.org/10.17816/phf34803/2713-153X-2020-2-2-84-93>
4. *Кузнецова Т.Ю., Ветчинникова Л.В., Титов А.Ф.* Аккумуляция тяжелых металлов в различных органах и тканях березы в зависимости от условий существования // *Тр. Карел. НЦ РАН.* 2015. № 1. С. 86–94. <https://doi.org/10.17076/eco27>
5. *Ветчинникова Л.В., Кузнецова Т.Ю., Титов А.Ф.* Особенности накопления тяжелых металлов в листьях древесных растений на урбанизированных территориях в условиях севера // *Тр. Карел. НЦ РАН.* 2013. № 3. С. 68–73.
6. *Панин М.С., Жилкишинова Д.С., Есенжолова А.Ж.* Микроэлементный состав листьев *Betula pendula* Roth, произрастающей в горнодобывающих и урбопромышленных ландшафтах Восточного Казахстана // *Экол. урбан. территорий.* 2012. № 3. С. 75–81.
7. *Масленников П.В., Дедков В.П., Куркина М.В., Ващейкин А.С., Журавлев И.О., Бавтрук Н.В.* Аккумуляция металлов в растениях урбоэкосистем // *Вестн. Балт. фед. ун-та им. И. Канта.* 2015. № 7. С. 57–69.
8. *Протасова Н.А., Беляев А.Б.* Химические элементы в жизни растений // *Сорос. обр. журн.* 2001. № 3. С. 25–32.
9. *Диярова Э.Р., Гиниятуллин Р.Х., Кулагин А.А.* Содержание металлов в древесных растениях, произрастающих на отвалах Учалинского горнообогатительного комбината Республики Башкортостан // *Вестн. Оренбург. гос. ун-та.* 2009. № 6. С. 118–120.
10. *Zakrzewska M, Klimek B.* Trace element concentrations in tree leaves and lichen collected along a metal pollution gradient Near Olkusz (Southern Poland) // *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 2017. № 100(2). P. 245–249. <https://doi.org/10.1007/s00128-017-2219-y>
11. *Gorelova S.V., Frontasyeva M.V.* The use of higher plants in biomonitoring and environmental bioremediation // *Phytoremediation.* Springer, Cham, 2017. С. 103–155.
12. *Экспериандова Л.П., Беликов, К.Н., Химченко С.В., Бланк Т.А.* Еще раз о пределах обнаружения и определения // *Журн. аналит. хим.* 2010. Т. 65. № 3. С. 229–234.
13. *Воткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.Е., Прохоров В.Г.* Справочник по геохимии. М.: Недра, 1990. 480 с.
14. *Горбунова В.Д., Махнев А.К.* Соотношение элементов питания в листьях белых берез вдоль высотного градиента Северного Урала // *Леса России и хоз-во в них.* 2017. № 4(63). С. 48–55.
15. *Волова А.В., Наквасина Е.Н.* Содержание макро- и микроэлементов в листьях березы (*Betula pendula* Roth) различных форм // *Лесн. вестн. / Forest. Bul.* 2019. Т. 23. № 6. С. 5–12.
16. *Ermakov V, Jovanovic L.* Characteristics of selenium migration in soil–plant system of East Meshchera and Transbaikalia // *J. Geochem. Explor.* 2010. V. 107. № 2. P. 200–205. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.07.007>
17. *Юргенсон Г.А., Шумилова Л.В., Хатькова А.Н.* Лезжалые золотоносные хвосты комбината “Балей-

- золото”: проблема утилизации // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2021. Т. 27. № 4. С. 45–54. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2021-27-4-45-54>
18. ОФС.1.5.3.0009.15 Определение содержания тяжелых металлов и мышьяка в лекарственном растительном сырье и лекарственных растительных препаратах [Электр. ресурс]. URL: <https://pharmacopoeia.ru/ofs-1-5-3-0009-15-opredelenie-soderzhaniya-tyazhelyh-metallov-i-myshyaka-v-lekarstvennom-rastitelnom-syre-i-lekarstvennyh-rastitelnyh-preparatah/> (дата обращения 15.11.2022).
19. Временный максимально-допустимый уровень (МДУ) содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках [Электр. ресурс]. URL: <https://fsvps.gov.ru/ru/fsvps/laws/6198.html> (дата обращения 15.11.2022).
20. *Виноградов А.П.* Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. Вып. 7. С. 555–571.

Elemental Composition of the Leaves of the Hanging Birch (*Betula pendula* Roth) in the Area of the Transbaikalia Gold Deposit

**V. P. Makarov^{a, #}, R. A. Filenko^a, I. E. Mikheev^a, T. V. Zhelibo^a,
E. A. Banshchikova^a**

^a*Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology SB RAS,
ul. Nedorezova 16a, Chita 672014, Russia*

[#]*E-mail: vm2853@mail.ru*

The influence of gold mining on the concentration of chemical elements in *Betula pendula* Roth leaves was studied. The intensity of absorption by the plant of a number of chemical elements, the possibility of using birch as a medicinal and forage plant, as well as for monitoring habitat changes were investigated. The study was conducted in plant communities located at production facilities and natural habitats in the area of the Baley gold deposit: tailings dumps of gold recovery factories (ZIF-1 and ZIF-2), a drainage landfill, a dump of the Sredne-Golgotai gold deposit, a tailings dump after processing monocytes, as well as in natural plant communities located in the vicinity of Baley at 13 trial sites in 2008, 2008 and 2021. The concentrations of elements in the leaves were arranged in descending order in the following sequence: Ca > Mg > P > Mn > Fe > Zn > Na > Ba > B > Cr > Ni > As > Cu > Mo > Sb > Pb > Co > Li > V > Cd > Bi > Se > Be. With respect to the clark of terrestrial plants, the concentrations of the elements were in the following order: Cr > As > Sb > Li > Ni > Ba > Fe > Mo > Bi > Co > Zn > Mg > Clark > Mn > P > Ca > Cu > B > Pb > Se > Cd > V > Be > Na. The absorption of As at production facilities exceeded the norm established for medicinal plant raw materials. The use of branch feed in a number of areas is not allowed due to the high level of Zn, Fe, Sb, Ni, Cr, Co, As, Cd. A relatively high coefficient of biological absorption by birch leaves Zn, Mn, P, Ca, Mg was obtained.

Keywords: *Betula pendula*, absorption of chemical elements, gold deposit.